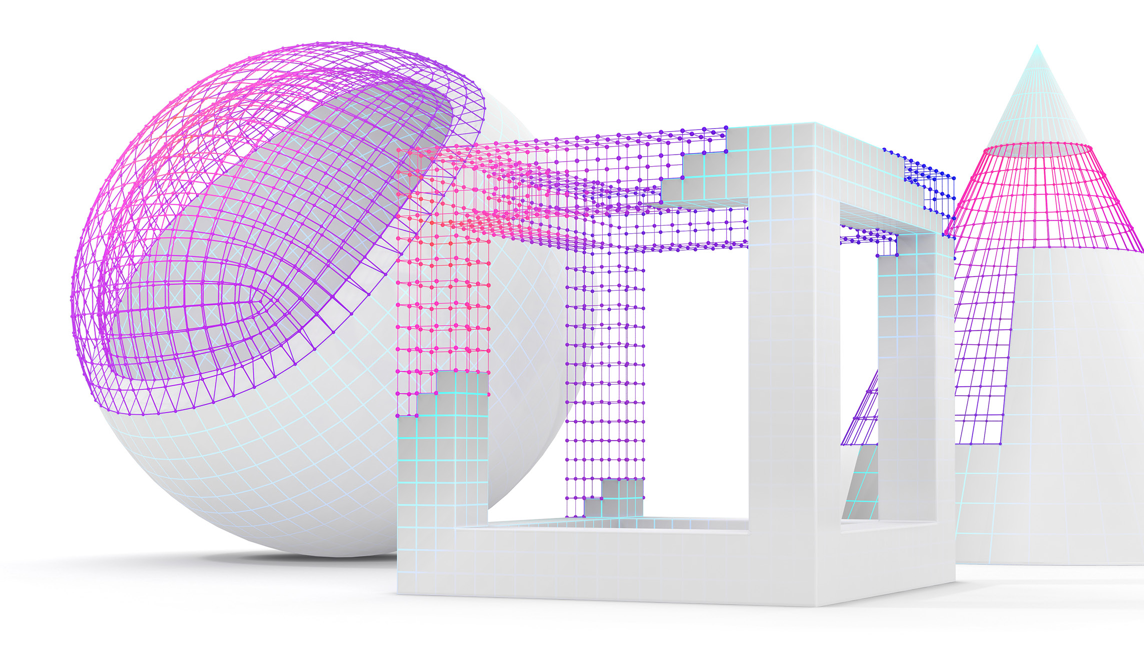
# الطباعة الثلاثية الأبعاد

## ميلاد ثورة صناعية جديدة



هود ليبسن
وميلبا كيرمان

# الطباعة الثلاثية الأبعاد

## ميلاد ثورة صناعية جديدة

**تأليف**
**هود ليبسن وميلبا كيرمان**

ترجمة
زياد إبراهيم

مراجعة
مصطفى محمد فؤاد



# الطباعة الثلاثية الأبعاد

هود ليبسن وميلبا كيرمان

**Fabricated**

Hod Lipson and Melba Kurman

**الناشر مؤسسة هنداوي سي آي سي**
المشهرة برقم ١٠٥٨٥٩٧٠ بتاريخ ٢٦ / ١ / ٢٠١٧

٣ هاي ستريت، وندسور، SL4 1LD، المملكة المتحدة
**تليفون:** ‎+ ٤٤ (٠) ١٧٥٣ ٨٣٢٥٢٢
**البريد الإلكتروني:** hindawi@hindawi.org
**الموقع الإلكتروني:** http://www.hindawi.org



تصميم الغلاف: عبد العظيم بيدس.

الترقيم الدولي: ٩٧٨ ١ ٥٢٧٣ ١٦٢٨ ٧

# المحتويات

إهداء إلى:

تينا ويوري كيرمان،

رينا وستيفن ليبسن.

# شكر وتقدير

هذا الكتاب ثمرةٌ طبيعيةٌ لمناقشات مُلهِمة ومستنيرة مع أشخاص كثيرين. ونود أن نشكر الأشخاص التالين من أجل تخصيص بعض الوقت للتحدث معنا ومراجعة محتوى الكتاب.

نشكر دوين ستورتي على معرفته التقنية ورؤاه الشاملة والمفيدة؛ وروبرت سكوينبرج على شغفه بكلِّ ما يتعلق بالطباعة الثلاثية الأبعاد؛ التقنية والتصميم واستراتيجية العمل؛ وتيموثي ويبر على المناقشات التوضيحية والمواقف المرحة ولحظات الاكتشاف المفاجئ؛ وإيريك هينز على التعليقات المدروسة والرؤى القيِّمة؛ ومارك جانتر على الإبداع اللامحدود في دفع التطور التكنولوجي؛ وكاثي لويس وراجيف كولكارني وإيب رايكنتال على استضافتنا في شركة ثري دي سيستمز ومشاركتنا رؤيتهم؛ وبراندون بومان على النقاشات المتعلقة بطباعة الطعام؛ وجونزالو مارتينيز على تسليط الضوء على مستقبل التصميم بمساعدة الكمبيوتر؛ وآدم ماير على التجول بنا في شركة ميكربوت؛ وبيل يانج وتيد هول على مشاركتنا تجارِبهما المباشرة في التصنيع الشخصي؛ وجون تي لي على توضيح عدد كبير من النقاط الدقيقة الخاصة بالجانب التِّجاري للطباعة الثلاثية الأبعاد؛ وأدريان بوير على استضافتنا في جامعة باث ورؤاه فيما يخص المِلْكية الفكرية ومستقبل التصنيع بالإضافة وقيادة مشروع ريب راب؛ وفيليب ديلامور وأنتوني روتو وروس باربر وهون تشانج على استضافتنا في كلية الموضة في لندن؛ ويرون فان أمجيد لاستضافتنا في كلية الرابطة المعمارية للهندسة المعمارية في لندن؛ وجلين بول وجيني تشو وويليام كيلستروم وجيك كوهين من جامعة فيرجينيا لتعريفنا بكيفية التدريس؛ وجوناثان بوتشر وياسر شانجاني على التحدث إلينا عن الطباعة الحيوية؛ وكريس جونسون على توضيح وشرح مستقبل التصميم بمساعدة الكمبيوتر؛ وديف وايت وريان كين على مشاركة خبراتهما عن الطباعة الثلاثية الأبعاد في قاعات الدراسة؛ وجيني سابين على الكشف لنا عن عملها في التصميم

المعماري المستوحى من علم الأحياء؛ وجيسي رويتنبرج على تعريفنا بمدى مشاركة شركة استراتاسيس في العملية التعليمية؛ وجوش هاركر وإيال جيفر على التحدث إلينا عن فنهما الرائد المطبوع بتقنية ثلاثية الأبعاد؛ وإدواردو نابادينسكي وأوفير سوشيت ودانيال ديكوفسكي لدعوتنا لزيارات عدة إلى شركة أوبجيت ومشاركتنا معلومات حول مستقبل المواد الرقمية؛ وتيري ولرس على البحث والتحليل الرائعين ومشاركتنا بياناته؛ وتشاك هال وجو بيمان وكارل ديكارد على تأسيس مجال الطباعة الثلاثية الأبعاد؛ وجوريس بيلز على تقديمنا لشركتي شيبوايز وماترياالايز؛ ومايكل جاسليك على تحدي افتراضاتنا المسبقة حول ما يجب أن يُطبع؛ ونوي وماور شال على جرأتهما على صناعة بعضٍ من أول أصناف الطعام المطبوع في التاريخ؛ وفرانتس نيجل وجيف ليبتون على تصميم وصناعة بسكويت معقد الصنع ومتعدد المواد. وأخيرًا، نتوجه أيضًا بالشكر إلى شركة نيتفاب المحدودة على تصميم قرص الهامبرجر الثلاثي الأبعاد الموضوع على غلاف الطبعة الإنجليزية لهذا الكتاب، وباولو كيف من شركة كريتيف تولز على منحنا الصورة مجانًا. توضح صورة الغلاف قطعة فنية صممتها شركة نيتفاب المحدودة باستخدام برنامج سليكتف سبيس ستراكتشرز، التي استفادت من حرية الشكل والوظيفة التي يتيحها التصنيع بالإضافة؛ فعن طريق تقليد استخدام الطبيعة للتراكيب، يضم الهامبرجر العديد من أنواع التراكيب في عنصر واحد لتحقيق خواص مختلفة من مادة أساسية. أُنشئت هذه القطعة باستخدام مسحوق البولي أميد المصلد بالليزر من قِبَل شركة فيت فروث إنوفيتيف تكنولوجيان المحدودة في عام ٢٠٠٩.

نود أيضًا شكر كل المصممين والفنانين والمصورين الذين شاركونا مجانًا صورهم ورسوماتهم التوضيحية من أجل غلاف الكتاب وصفحاته الداخلية.

والشكر الجزيل لفريق فاب آت هوم بجميع أعضائه: المؤسس إيفان مالون والقائدين التاليين له دانيال كوهين وجيف ليبتون، والطلاب الجامعيين الذين طوروا المنصة على مدار ست سنوات.

وبالطبع، لا ننسى شكر الطلاب السابقين والحاليين وفريق العمل في معمل «الآلات الابتكارية» في جامعة كورنيل الذين صنعوا — وما زالوا يصنعون — مستقبلَ الطباعة الثلاثية الأبعاد: إيفان مالون ودانيال كوهين وكيان راسا وميجان بيري وناتاشا جانجي وأدالينا مكرجي ودان بيريارد وفرانتس نيجل وجوناثان هيلر وماكس لوبفسكي وجوناس نيوبرت وجيفري ليبتون وجيريمي بلوم وروب ماكردي وشيريل بيريش وأبورفا.

نقدِّر العمل الشاق الذي قام به فريق وايلي وإخلاصه، وخاصة ماري جيمس وكيفن كينت؛ حيث إن ماري هي من اقترحت فكرة تأليف كتاب عن الطباعة الثلاثية الأبعاد، وأقنعت مديريها بجدوى الموضوع وإثارته لاهتمام الناس، كما أشرفت بصبر على تأليف الكتاب متحملة آلام إنتاجه المتزايدة. أما كيفن كينت، فقد ساعدنا على نحو متقَن في تحويل مخطوطة الكتاب الأولية إلى واقع وإبقائنا على الطريق الصحيح لعدة شهور متواصلة. وبالطبع، لا ننسى شكر وكيلتنا الأدبية كارين جانتز زالر على رؤية القدرة الكامنة في الكتاب.

وأخيرًا، لم يكن لأي كتاب عن الطباعة الثلاثية الأبعاد أن يخرج إلى النور من دون إلهام وعبقرية المبتكرين المبدعين الجسورين والصناع والمخترعين والفنانين ورواد الأعمال في العالم حولنا. شكرًا لكم! فإن العالم يستفيد من الفيض المستمر للتقنيات الجديدة للطباعة والمواد الجديدة ونماذج العمل المبتكرة والتطبيقات والتصميمات الجديدة والرائعة. استمروا في تحقيق الإنجازات.

# مقدمة

أحد أعظم الأمور المتعلقة بمجال الطباعة الثلاثية الأبعاد هو أنه يتطور بسرعة رهيبة وتحدث التطورات التقنية فيه بقفزات هائلة. ومع ذلك، فإن الإبداع المتسارع الخطى أمر يصعب الإلمام به إلمامًا كاملًا؛ فبمجرد أن تنجح في تدوين أبعاد فكرة جديدة مراوغة على الورق، تكون قد أصبحتْ قديمة بالفعل، وهجرها الجميع ليمضوا قدمًا نحو أخرى أحدث.

أَلَّفنا هذا الكتاب على مدار تسعة أشهر محمومة، سَعَيْنا فيها على نحو دائم وراءَ تطوير منظور أوسع نطاقًا، عن طريق التحدث مع خبراء نعرفهم بالفعل، وتمشيط الإنترنت وتويتر بهوس كبير؛ بحثًا عن معلومات جديدة وأشخاص جدد نتحدث إليهم. اخترنا ألا نكتب ببساطة عن «كيفية استخدام طابعة ثلاثية الأبعاد» حيث إن كتابًا كهذا سيصبح غير ذي نفع في غضون بضعة أشهر. بدلًا من ذلك، وبما أن التكنولوجيا تتغير بسرعة بنحو يفوق الفترة التي يمكن أن يستغرقَها إنتاج أي كتاب، اخترنا عدم الاكتفاء بحديث سطحي عن الموضوع، وقررنا استكشاف آثار تقنيات الطباعة الثلاثية الأبعاد بنحو أعمق، وكيف أن هذه الإمكانية الجديدة للإنتاج سوف تغير حياتنا وقوانيننا واقتصادنا.

تُعَد كتابة مؤلفَيْنِ لكتاب واحد نعمة ونقمة في آنٍ واحد؛ فلا يوجد أفضل من رفيق سفر في رحلة الكتابة الموحِشة والمرهقة، ولن يوجد سواه في العالم من هو مستعد بلهفة لمناقشة وتحليل أفكار غير معروفة لكثيرين بدقة لساعات كلَّ مرة. لكن وجود مؤلفَيْنِ يُمثِّل تحديًا؛ فكيف يمكن إدارة طريقتَي سرد مختلفتين؟

هل يجب على المؤلفَيْنِ دمج خبراتهما ورؤاهما الفردية معًا والتحدث بصوت واحد؟ أم يجب نسبة كل فكرة وخبرة فردية لصاحبها (سواء هود أو ميلبا)؟ وبعد قليل من التفكير وعدة مراجعات، قررنا الآتي: الرؤى الجديدة ستكون بصيغة المتكلم الجمع،

أما الخبرات الفردية السابقة فستكون بصيغة المتكلم المفرد، مع عدم تحديد أيٍّ منا يتحدث؛ فمن الممكن أن يكون المتكلم هود في بعض الأحيان وميلبا في أحيان أخرى.

في أثناء تأليفنا لهذا الكتاب، شرُفنا بإجراء مقابلات مع أكثر من ٢٠ خبيرًا من مجالات وأماكن عدة حول العالم. انتقل حماسهم للموضوع إلينا، وكانت تعليقاتهم بشأن فصول الكتاب قيِّمة، ونود أن نعبِّر هنا عن تقديرنا لوقتهم وصبرهم، وقبل كل شيء، حقيقة أن طاقتهم الإبداعية تغير العالم الذي نعرفه.

نتمنى أن يلقى هذا الكتاب استحسانكم.

الفصل الأول

# كل شيء يصبح ضربًا من ضروب الخيال العلمي

المكان: حياتكِ.

الزمان: بعد بضعة عقود من الآن.

... حتى في المستقبل، يظل الاستيقاظ من النوم في الصباح أمرًا صعبًا.

تهب رائحة مافن التوت البري الطازجة المصنوعة من دقيق القمح الكامل من طابعة الطعام الموجودة في المطبخ. سُوِّقَت خراطيش هذه الطابعة التي تستطيع صناعة هذا المافن العضوي قليل السكر على أنها من المنتجات الكمالية، ونُزِّلَت الوصفات من صفحات العديد من الخبازين الماهرين البارزين التابعين لمطاعم ومنتجعات شهيرة.

في أول مرة عَرضْتِ طابعة الطعام على جدكِ، ظن أنها ماكينة أوتوماتيكية لصناعة الخبز؛ وهي جهاز يعود لثمانينيات القرن العشرين غزا مطابخ محبي الأكل على نحو كبير. ولم يقدِر على فهم لماذا تريدين الحصول على طعام معالَج باستخدام طابعة ثلاثية الأبعاد، إلى أن حان وقت الاحتفال السنوي بذكرى زواجه. وللاحتفال بهذه المناسبة، اشتريتِ خراطيش الطعام الفاخرة الباهظة الثمن، وطبعتِ لجدك وجدتك عشاءً احتفاليًّا من شرائح لحم التونة الطازجة، والكسكسي، وكعكة كريمة دوارة مصنوعة من الشكولاتة والموكا وتوت العُلَّيق، التي تختلف كل شريحة فيها عن الأخرى.

أصبحت السيطرة على مرض السكر أكثر سهولة منذ أن حَدَّثت شركة التأمين الصحي طابعة الطعام خاصتك لطراز طبي عالي الجودة؛ حيث تتلقى طابعات الطعام الطبية الجديدة الخاصة بمرضى السكر تدفقات من الإشارات اللاسلكية من جهاز صغير مزروع تحت جلدك يتتبع قراءات مستوى السكر في دمك. وعندما تستيقظ في الصباح، تتلقى

الطابعة أول قراءة في الصباح وتضبط كَمِّيَّة السكر والتوازن الغذائي في طعام الإفطار المعَد رقميًّا طبقًا لهذه القراءة.

بعد الانتهاء من الإفطار، حان وقت تفقُّد الأخبار. وأهم خبر هو تحديث بشأن عملية إنقاذ للعديد من عمال المناجم الذين علِقوا تحت الأرض لأسبوع كامل بسبب انهيار نفق المنجم؛ مما تركهم في أعماقه. في البداية، حاولت فرق الإنقاذ إخراجهم عن طريق الحفر، لكنهم كادوا يتسببون في حدوث انهيار مميت للأنقاض.

لحسن الحظ فإن الشركة القائمة على المنجم اتبعت تعليمات السلامة الفيدرالية، وأتاحت لعمال المنجم معدات السلامة المتعارَف عليها. تُعتبر الطابعات الثلاثية الأبعاد الخاصة بالسلامة من الأدوات المعيارية التي يحملها عمال المناجم معهم لأنفاق المناجم العميقة. وقبل نزول العمال إلى نفق المنجم، يتأكد الفنيون أن كل طابعة حدَّثت ملفات التصميمات لكل جزء آلة من الضروري وجوده داخل المنجم. وتهبط الطابعة الثلاثية الأبعاد مع الآلات الأخرى تحسبًا لتعطل أي جزء من الآلات والاحتياج إلى تغييره بنحو سريع تحت الأرض.

تفيد أنباء اليوم عن كارثة المنجم أن طابعة السلامة المحمولة تحولت لبطل غير متوقع؛ فلعدة أيام، كان العمال العالقون تحت الأرض يتحدثون مع التقنيين على السطح من خلال وصلة لاسلكية ضعيفة؛ حيث يعمل كلا الفريقين معًا لتحسين مخططات التصميم الخاصة بالطابعة للأجزاء البديلة.

لكن عملية الإنقاذ التي كان من المفترض أن تكون قصيرة وقياسية أصبحت أكثر تعقيدًا؛ فطباعة بعض الأجزاء البديلة أمرٌ سهل، لكن السبب في تأخر مجهودات الإنقاذ هو أن تصميمات الأجزاء المعطَّلة أخذت تنبعج بعد تركيبها بسبب مستويات الرطوبة العالية غير المتوقعة داخل نفق المنجم.

لكن الأنباء السارة هي أن الموقف داخل المنجم يبدو أفضل اليوم؛ حيث يذكر المراسل أن المحاولة الثالثة لطباعة الأجزاء البديلة تخطت اختبارات التحمل تحت ظروف تحاكي الظروف داخلَ المنجم، وذلك في مقر الشركة القائمة على المنجم. وسيَطبع عمال المنجم اليومَ التصميمَ المُحدَّث تحت الأرض، وإذا نجح هذا، فسيبدءون إعادة بناء الآلة المعطوبة الليلة.

بينما تغادرين منزلكِ متوجهة للعمل، ترين رافعة وعاملَ بناءٍ وحيدًا يعمل في جهد وصمت في قطعة أرض خالية على الجانب الآخر من الشارع. الحي كله يتحدث عن مشروع

جارك لبناء بيته؛ فمنذ بضعة أسابيع مضت، هدم جارك بيته الخشبي ذا الطراز العتيق لبناء بيت جديد فخم صديق للبيئة.

يلوِّح جارك لكِ بيديه من عند صندوق البريد، ويُريكِ الكُتيِّب التسويقي الذي يُظهِر أن المنزل الجديد نموذج فاخر من شركة تُدعى فوم هوم، وسيكتمل بناؤه في غضون أسبوعين. يوضح كتالوج فوم هوم أن حوائط المنزل ستُزود بمستشعرات داخلية للطقس. أما السقف، الذي سيوضع فوق المنزل في نهاية عملية البناء، فسيحتوي على ألواح للطاقة الشمسية، كما ستحتوي الحوائط على الأسلاك الكهربائية والمواسير النُّحاسية على نحو مسبق.

تراقبين أنت وجارك رافعة البناء وهي تُحرِّك ببطء فوهة ضخمة تقبع فوق الأساس الجديد للمنزل. هذه الفوهة تمسح المكان وتضبط المخطط الأساسي، وفي نفس الوقت تُخرج خليطًا مصنوعًا من الأسمنت وبعض مواد البناء الاصطناعية. تتمثل مَهمة عامل البناء في التأكد من أن أحدًا لا يمشي فوق الموقع خلال عملية البناء، والعقل المحرك لهذه المعَدات هو كمبيوتر صغير موصَّل برافعة البناء، يوجِّه عملية بناء المنزل.

يتابع الحي مشروع بناء منزل فوم هوم باهتمام شديد، بينما تُقام حوائط المنزل ببطء. هل تتذكر الطُّرفة القديمة التي أُطلقت في الأيام الأولى لأَتْمَتَةِ المصانع التي تقول: «كل ما تحتاج إليه هذه الأيام لتشغيل مصنع هو رجل وكلب؛ الرجل لإطعام الكلب والكلب لعض الرجل إذا ما حاول لمس أي شيء»؟

حتى الآن، فإن المنزل الذي يكتمل ببطء يبدو رائعًا؛ فحوائطه منحنية في أنماط متناسقة وبها تجاويف وتقوسات عذبة المنظر. لا يمكن لأحد بناء منزل كهذا بالإطارات الخشبية، مهما كان عدد العاملين في موقع البناء. لم يَرَ أحدٌ بعدُ الجزءَ الداخلي من المنزل الجديد لكن الشائعات تقول إن جارك طلب حوائط داخلية من طراز شهير، ستبدو كما لو كانت مبنية بالطوب على الطراز القديم.

تَصِلينَ لمكتبكِ أخيرًا للاطلاع على آخر التفاصيل الخاصة بتحقيق طويل تقودينه منذ شهور؛ فقد كُلِّف فريقك بالتحقيق في نوع جديد من الأسواق السوداء يتاجر في الأعضاء البشرية البديلة. هناك عدد متزايد من المرضى الذين يبحثون بيأس عن أعضاء بديلة، ويشترونها من موفِّرين محتالين غير مرخصين لخدمات الطباعة الحيوية، بدلًا من اللجوء إلى الموفِّرين المعتمدين لهذه الخدمة الطبية. يستمر موضوع الطباعة الحيوية لأعضاء الجسم المخصصة في إثارة الجدل لدى العامة، محدثًا انقسامًا فاق نقاشات الخلايا الجِذْعية أو الإجهاض أو الاستنساخ التي كانت سائدة في جيل أجدادنا.

أصبحت صناعة أي عضو بشريٍّ بديلٍ أمرًا سهلًا للغاية، وانخفضت تكلفة المسح العالي الجودة للجسم بالكامل بنحو كبير على مدى السنين القليلة الماضية؛ مما يدفع شبابًا في العشرينيات من عمرهم إلى إجرائه، ويحتفظون بالبيانات لوقت لاحق في حالة احتياجهم لها إذا حدث أي مكروه واحتاجوا لاستبدال أي عضو على نحو سريع. في بعض الأحيان، يتعرضون لمشكلات كبيرة في المفاصل. لكن في الواقع، فإن أكثر الاستخدامات شيوعًا لـ «ملفات تصميم الجسد» هو في الجراحات التجميلية للحصول على بشرة مشدودة خالية من أي تجاعيد، وعلى جسم شاب.

المشكلة ليست في الطباعة الحيوية؛ فمعظم الناس في الواقع يؤمنون بأنها تقنية منقذة للحياة، لكن التحدي يتعلق بنمو هذه الأسواق السوداء الناشئة. إن تنظيم إنتاج أعضاء الجسم المطبوعة الجديدة أمرٌ صعب بسبب انخفاض تكلفة الطابعات الحيوية؛ إذ يتهافت تجار السوق السوداء على الحصول على الطابعات الحيوية الطبية القديمة بأسعار تقلُّ عن سعر أي سيارة حديثة؛ حيث إن طرازات العام الفائت من الطابعات الحيوية تبيعها المستشفيات وعيادات الجراحات كلَّ عام.

خلال التحقيق، تكتشفين أن الأعضاء التي تُباع في السوق السوداء تعمل جيدًا في أغلب الأحيان؛ لكن المشكلات تحدث بسبب ملفات التصميم المعيبة أو صنَّاع الأعضاء المهمِلين الذين يقومون بعملهم بأرخص الطرق الممكنة في بيئة طباعة غير معقَّمة. وقد أدى هذا إلى موت بعض المرضى مؤخرًا بسبب شرائهم لأعضاء كمالية غير مصدَّق عليها للتحسين من مظهرهم وأدائهم البدني. وتحاول عائلاتهم تحديد من سيقاضونه؛ المصنِّع المحتال، أم مورِّد الحبر الحيوي، أم مصمِّم العضو، أم الشركة التي صادقتْ على التصميم.

يتراوح من يعملون في السوق السوداء الخاصة بطباعة الأعضاء ما بين المعالجين حَسني النية والقَتلة من تجار اللحم البشري المزيف الذين يهمهم الربح فقط. البعض يسمِّي تجار السوق السوداء أصحاب الكفاءة الذين يعملون في مجال الصحة أبطالًا؛ لأنهم يساعدون المرضى في الحصول على أعضاء جديدة حيوية بأسعار منخفضة؛ بينما يأسى آخرون بنحو كبير لسعي تجار الأعضاء للتربح من شراء وبيع الأنسجة الحية الضرورية للأشخاص المحتاجين إليها، وخاصة إذا كانت الأعضاء الجديدة المطبوعة تفتقر إلى الجودة.

في نهاية يوم العمل، تمُرِّين بمدرسة ابنتك التي تدرس في المرحلة المتوسطة. أنتِ من أولياء الأمور الرعاة لمعرض العلوم هذا العام، تخبرك معلمة ابنتك أن الطابعات الثلاثية الأبعاد تُفسد الثقافة العامة لمعرض العلوم؛ لأن الطلاب الكسالى يطبعون أجسامًا معقدة

على نحو ثلاثي الأبعاد دون بذل أي جهد أو اكتساب مهارات؛ فكل ما يحتاجون إليه هو ملف تصميم جيد. ولا يمتلك العديد من الطلاب الذين ينتمون لأُسَرٍ ذات دخل أقلَّ طابعاتٍ ثلاثية الأبعاد في المنزل؛ لذا فهم لا يحصلون على الوقت الكافي للتصميم والممارسة اللازم لمجاراة الطلاب الآخرين.

هناك مفاجأة أخرى؛ تقول المعلمة إن معرض هذا العام سيشهد مشاركة الآباء في عملية التنظيف؛ ففي العام الماضي وبعد انتهاء المعرض، اشتكى القائمون على النظافة في المدرسة من أن أرضية صالة الألعاب امتلأت ببقايا العشرات من النماذج المطبوعة، والأسوأ من ذلك أن الطلاب والمعلمين ظلوا لأيام عدة بعد انتهاء المعرض يتعثرون في عشرات الروبوتات الجاهزة التي في حجم الفئران، والتي ظلت تدور هنا وهناك محدِثة قعقعة في ردهات المدرسة. كان بعض الروبوتات المطبوعة تُصدر بعض الأجزاء المناسبة والمبرمجة سلفًا من المعارف العلمية، لكن القليل من تلك الروبوتات المتجولة بدت كما لو كانت قد استوعبت وأخذت تُصدر ما هو غير مسموح لها من الحكمة التي تنبض أكثر بالحياة.

عندما تعودين للمنزل بصحبة ابنتك، يخبرك زوجك بأخبار سعيدة؛ فمشروعه للتصنيع بالطباعة الثلاثية الأبعاد قد قُبل للتوِّ في شبكة تصنيع سحابي خاصة بأجزاء الطائرات. بدأ التصنيع السحابي يحل محل التصنيع الواسع النطاق كطريقة إنتاج جديدة. ومثل الحوسبة السحابية، فإن التصنيع السحابي نموذج إنتاج لا مركزي وضخم موازٍ. فتطلب الشركات الكبرى أجزاء وخدمات من شبكة منتقاة مكونة من العديد من شركات التصنيع الصغيرة التي اتحدت معًا لتصنيع هذه الأجزاء الخاصة.

بدأ التصنيع السحابي في الانتشار بنحو سريع في الصناعات الإلكترونية والطبية والخاصة بالطائرات، وهذه الشركات الكبيرة تحتاج إلى أجزاء معقدة ودقيقة جدًّا، لكن ليست بكَميات كبيرة؛ لذا فإن شركات التصنيع السحابي الصغيرة تُوفِّر لها الكثير من المال، كما تميل هذه الشبكات السحابية لأن تكون بالقرب من عملائها حتى تقل مسافات شحن الأجزاء المطبوعة، وتحتفظ هذه الشركات بتصميمات أجزاء المنتجات في سجل رقمي وتصنع تصميمًا واحدًا أو بضعة تصميمات في كل مرة. وهذه الشبكات تُعتبر نعمة كبيرة للاقتصادات الإقليمية في كل مكان؛ إذ أدت إلى خلق وظائف محلية في شركات التصنيع وتقديم الخدمات الصغيرة المتخصصة.

تتكون سحابة شركة زوجك التصنيعية من شركات صغيرة تعمل على تصنيع أجزاء حَقْن وقود متخصصة لمُصنِّعي الطائرات التِّجارية والعسكرية. وللانضمام إلى هذه الشبكة،

كان على شركته إثبات براعتها في التصنيع عن طريق طباعة عينات من أجزاء الطائرة على نحو ثلاثي الأبعاد في إطار زمني محدد. أخضعت شبكة التصنيع عينات الأجزاء خاصته لاختبارات التحمل، واجتازتها بنجاح، وبعد بعض المفاوضات الخاصة بهوامش الربح وقدرة التصنيع، قُبلت شركته في الشبكة.

أخيرًا، يقترب اليوم من الانتهاء. يحب ابنك روتين ما قبل النوم؛ من غسيل الأسنان وسماع حكاية خيالية في السَّرِير. تكتشفين الليلةَ أن فرشاة أسنانه ضاعت كالعادة، ويظن أنه ربما تركها في بيت صديقه أمس. يمكنك الذهاب مسرعة للمتجر لابتياع واحدة جديدة، لكن هناك حل أكثر سهولة.

تُشغِّلين الطابعة الثلاثية الأبعاد التي تمتلكينها وتدَعين ابنك يتصفح التصميمات العديدة والمختلفة لفرش الأسنان. هناك شركات كثيرة تعرض تصميماتها للبيع من خلال الطابعة المتصلة بالإنترنت، لكن ابنك يعرف مسبقًا أنه يريد فرشاةً من نوع زي براش التي ما زالت تُعَد صفقة رابحة؛ إذ كانت بتسعة وتسعين سنتًا فقط. يحب ابنك حقيقة أن هناك العديد من شخصيات الرسوم المتحركة المختلفة متاحة لوضع صورتها على مِقْبَض الفرشاة. تضغطين زر الموافقة على شراء الفرشاة، وتمسحين المقاييس — الخاصة بحجم يد ابنك، وشكل فمه المفتوح — بعصًا صغيرة موصلة بالطابعة.

تبدأ عملية الطباعة، وتظهر أسماء المصممين على شاشة الطابعة اللامعة، كما هو الحال في مقدمة الأفلام، بدءًا باسم مصمم برنامج فرشاة الأسنان حتى الشركة التي تمتلك حقوق الملكية الخاصة بتصميمات شخصيات الرسوم المتحركة، وستصبح فرشاة الأسنان الجديدة متاحة في غضون ١٥ دقيقة.

رَيْثَما تُنهي الطابعة طباعة الفرشاة، تَرْوِينَ لابنك قصة ما قبل النوم، عما كانت عليه حياتك وأنتِ طفلة بينما يستمع إليك بتشكك؛ فهو لا يصدِّق أنكِ عندما كنتِ صغيرة كانت فرش الأسنان جميعها متشابهة، وأنكِ إذا طلبت شيئًا عبر الإنترنت فيستغرق الأمر وقتًا طويلًا — ٢٤ ساعة عادة — حتى يصل إلى عتبة باب بيتك.

يجعله هذا يقول بأدب: «يا إلهي! لا بد أن الحياة كانت عصيبة آنَذاك.»

الفصل الثاني

# آلة يمكنها صنع أي شيء تقريبًا

ماذا تفعل لو كنتَ تمتلك آلة يمكنها صنع أي شيء؟

في إنجلترا، يمسح فنيٌّ أقدام وكواحل العَدَّائين الأولمبيين، وينقل هذه البيانات إلى كمبيوتر يقوم ببعض الحسابات السريعة، ثم يطبع الفني على نحو ثلاثي الأبعاد أحذية عَدْو جديدة، مصممة خصوصًا لتُناسب الوزن والشكل الفريدين لجسد كل لاعب، وكذلك ذوقه وطريقة عَدْوه.

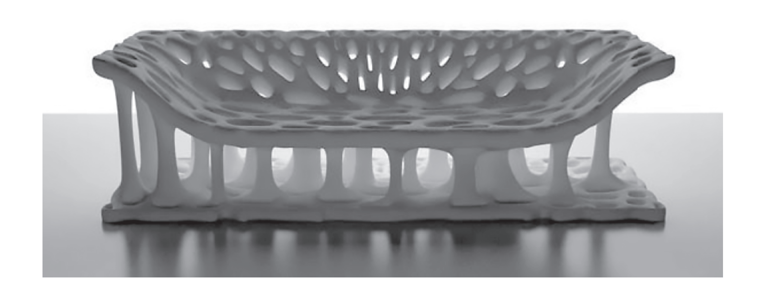
على الجانب الآخر من العالم، فإن وكالة ناسا تختبر قيادة نسخة من مركبة المريخ خاصتها، التي تُدعى مارس روفر، في صحراء أريزونا. تضم هذه المركبة أجزاءً معدِنية عديدة مصنوعة خصوصًا ومطبوعة بنحو ثلاثي الأبعاد. العديد من هذه الأجزاء معقدة التصميم؛ حيث تحتوي على منحنيات وتجاويف داخلية لم يكن تصنيعها ممكنًا من دون طابعة ثلاثية الأبعاد.

وفي اليابان، تحاول أمٌّ حُبلى صنع أفضل تذكار لأول أشعة بالموجات فوق الصوتية لجنينها؛ فيحرر طبيبها صورة الأشعة خاصتها، ويطبع على نحو ثلاثي الأبعاد نسخةً دقيقة مليئة بالتفاصيل من الجنين. والنتيجة كانت نموذجًا بلاستيكيًّا متطورًا ثلاثي الأبعاد للجنين الصغير موضوعًا داخل حافظة من البلاستيك الشفاف والصلد للاحتفاظ به للأجيال القادمة.

هذه المعجزات التصنيعية المتواضعة تحدث بالفعل على أرض الواقع، وفي المستقبل غير البعيد جدًّا، سوف يطبع الناس بالتقنيات الثلاثية الأبعاد أنسجة حية، وطعامًا مخصصًا، ومكونات إلكترونية مجمعة بنحو كامل وجاهزة للاستعمال. هذا الكتاب يتحدث عن

طريقة جديدة لصنع الأشياء، وفي الفصول القادمة، سنشرح تقنيات الطباعة الثلاثية الأبعاد وأدوات التصميم بأسلوب مبسط. أما بالنسبة إلى القراء محبي التكنولوجيا، فهناك عدد من الفصول سوف يتعمق في تفاصيل حاضر الطباعة الثلاثية الأبعاد ومستقبلها. بعد ذلك، سنستكشف تبعات هذه التقنية، على الأصعدة الاقتصادية والشخصية والبيئية.

تفتح الطباعة الثلاثية الأبعاد آفاقًا جديدة؛ مما سيسبب اضطرابًا هائلًا في مجالَي التصنيع والأعمال التقليديين؛ حيث إن الناس العاديين سيُتاح لهم أدوات تصميم وإنتاج قوية، وستنتهي سلطة قانون الملكية الفكرية تمامًا.



مقعد طويل مطبوع بالمقاس الطبيعي من مادة تشبه الصخر باستخدام طابعة دي شيب (الصورة من إهداء أندريا مورجانتي وإنريكو ديني).

بعض الناس يتذكرون بالضبط أين كانوا عند مشاهدة أول هبوط للإنسان على سطح القمر، بينما يتذكر آخرون الأسابيع الأولى المليئة بالفوضى بعد انهيار جدار برلين. أما أنا، فأتذكَّر أول مرة سمعت فيها عن الطباعة الثلاثية الأبعاد.

كان هذا في أواخر ثمانينيات القرن الماضي. كان المكان ندوة هندسة مملة عن هندسة التصنيع. كانت درجة الحرارة مرتفعة داخل القاعة، وكان المُحاضر — لسوء الحظ — يمتلك صوتًا رتيبًا يبعث على النوم؛ مما أدخلني أنا وزملائي فيما يشبه السُّبَات الجماعي.

ثم فُتِح باب القاعة مُصدِرًا صوتًا مرتفعًا، بدد الهدوء المسالم الباعث على النُّعاس للمحاضرة التي كانت في فترة ما بعد الظهيرة، واندفع رجل غريب داخلَ القاعة. أعلن زائرنا غير المتوقع أنه مندوب مبيعات تابع لشركة تسمى كيوبيتال سيستمز. لم نكن قد سمعنا بهذه الشركة من قبلُ، التي كانت حينها واحدة من شركتين فقط في العالم تبيعان طابعاتٍ تِجارية ثلاثية الأبعاد.

وبطريقة مفعمة بالنشاط، لوَّح الرجل بجسم بلاستيكي فوق رأسه، التي اكتست بشعر غير مهذب، معلنًا أن ثورة تصنيعية كانت تختمر. وزعم بكل جرأة قائلًا: «أحمل في يدي مستقبل التصنيع، هذا الجسم البلاستيكي صنعه ليزر «طابع» للبلاستيك.»

تقلقلنا أنا وزملائي في مقاعدنا في فضول، مفتونين بما يقوله هذا الرجل، وتساءلنا عن السبب الذي أتى به إلى قاعتنا. في تلك اللحظة، وبعد شعور أستاذنا باهتمامنا بما يقوله الضيف، ترك القاعة لزائره المتحمس في تصرف حكيم منه، وعَلِمنا لاحقًا أن أستاذنا هو من دعا مندوب المبيعات ليحاضرنا.

توقف ضيفنا المتقِن لأساليب العرض لبُرهة بنحو مدروس متلذذًا بالحيرة التي بدت علينا، ثم بدد الصمت السائد بطلبه من أحد الطلاب أن يحرك ذراع الإدارة البارزة من الجسم البلاستيكي. ما زلت أستطيع تذكُّر صوت القعقعة الحاد الذي تردد في القاعة أثناءَ تحريك زميلي للذراع بكل حماس، لوقت بدا كالدهر. وداخلَ الجسم البلاستيكي، حركت مكونات متداخلة معقدة بعضها بعضًا.

عادت أدمغتنا — التي سيطر عليها النُّعاس — إلى العمل، وهمهمنا بأسئلة بعضنا لبعض: «هل قال إنه طبع هذا الجسم باستخدام الليزر؟» فحصت أنا وزملائي التروس المتحركة محاولين معرفة أين ستنتهي هذه التسلية غير المتوقعة؟

زادت حَيْرتنا أكثر عندما ألقى مندوب المبيعات قُنبلته الثانية في وجوهنا قائلًا: «كل هذه التروس والمقابض والنتوءات التي تَرَوْنها هنا لم تُجمع؛ بل طُبعت في المكان المخصص لها كمجموعة واحدة مجمعة سلفًا من الأجزاء المختلفة.»

تعالَى صوت الهمهمات الحائرة في القاعة بنحو كبير، في الوقت الذي أنهى زائرنا المفعم بالنشاط عرضه بنحو مَرِح بنقطة أخيرة، وهي أن جهاز كمبيوتر — وليس إنسانًا — كان يدير الآلة الإعجازية هذه خلال عملية الإنتاج. ثم فتش الرجل في حقيبته، وأخرج ورقة لوَّح بها في وجوهنا. أظهرت تلك الورقة صورةً لكمبيوتر تحمل شاشته ملف تصميم لنفس الجسم البلاستيكي الذي أرانا إياه.

بعد ذلك، ابتسم مندوب مبيعات كيوبيتال سيستمز، وسأل عما إذا كان لدينا أي أسئلة. أمطرناه أنا وزملائي بالأسئلة بعد هروب النُّعاس. ما الذي كان يعنيه بـ «طباعة» كل هذه الأجزاء البلاستيكية باستخدام الليزر؟ وما نوع آلة التصنيع التي يمكنها صنع جسم مكون من أجزاء متداخلة لا تحتاج إلى التجميع؟ وهل يمكن لتلك الآلة طباعة شيء من مواد غير البلاستيك؟ وبالطبع السؤال الرئيسي: كم يتكلف شراء مثل هذه الآلة للاستخدام الشخصي؟

# ‘Revolutionary’

## Machine makes 3-D objects from drawings

By Kathleen Sullivan
American-Statesman Staff

Wedged into the corner of an unused photo lab at the University of Texas is an ungainly machine that can transform a computer drawing into a three-dimensional model at the touch of a button.

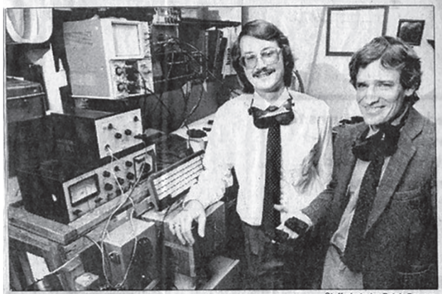
Sometime next year, the machine, which was developed by a UT graduate student, will make its way out of the lab and into the commercial arena. It will leave with the blessing of the UT Board of Regents, which Thursday gave an Austin company exclusive licensing rights to the “revolutionary” new technology embodied in the machine.

The licensing pact paves the way for the first transfer of technology from the University of Texas at Austin to a commercial venture.

The company that won the right to market the invention is Nova Automation Corp., whose principal shareholders are an Austin consulting engineer and Nova Graphics International Corp., an Austin-based computer graphics software firm.

The agreement represents a “hard fought” victory for UT's fledgling Center for Technology Development and Transfer, said Meg Wilson, coordinator of the center, which was given life during the last Texas Legislature and got

See Inventor, A11



Staff photo by Ralph Barrera
Associate Professor Joe Beaman shows some three-dimensional plastic models made by the ‘selective laser centering’ device developed by Carl Deckard, left.

كارل ديكارد وجو بيمان يخترعان أول طابعة تصليد انتقائي بالليزر في جامعة تكساس حوالي عام ١٩٨٦ (الصورة مهداة من كارل ديكارد وجو بيمان).

شعرنا على الفور أن التصنيع التقليدي سيصبح أمرًا مهجورًا من الماضي.

ما زلت أتذكَّر ذلك اليوم؛ فالعرض التقديمي الحماسي لُمحاضِرنا أقنعني أن هذه الآلة الإعجازية ستُحدِث ثورة بالفعل في طريقة تصميمنا وصنعنا لكل شيء. لم أكن رأيتُ من قبلُ علاقةً مقرَّبة بين التصميم باستخدام أحد برامج الكمبيوتر لجسم ما — كانت برامج التصميم حديثة العهد وكانت شغفًا متناميًا لديَّ في ذلك الوقت — وتجسيده المادي.

كان ذلك اليوم منذ عقدين، ولم تحدث الثورة التي وُعدنا بها بسرعة كما كان مخططًا لها؛ فبعد بضع سنوات، أغلقت كيوبيتال أبوابها، ومثل العديد من التقنيات

الرائدة، كانت عملية الطباعة الثلاثية الأبعاد الخاصة بهذه الشركة تتسم بالبطء والتعقيد الشديدين، وكانت الآلات التي تنفذها باهظة الثمن للغاية بحيث كان من غير الممكن أن تعتمد عليها شركات التصنيع الهادفة للربح.

أتساءل أحيانًا أين ذهب ذلك الرجل بعد إغلاق كيوبيتال لأبوابها؛ فقد أصاب عرضه التقديمي — الجريء والمثير — هدفه جيدًا. ولن يمر وقت طويل قبل أن ينشئ عامة الناس أجسامًا مادية، ويمزجونها بأخرى، ويدمرونها، بنفس سهولة تعديل صورة رقمية.

## (١) طباعة الأجسام الثلاثية الأبعاد

مثل العصا السحرية في حكايات الأطفال الخرافية، تَعِدنا الطباعة الثلاثية الأبعاد بالتحكم في العالم المادي من حولنا؛ فهي تتيح لعامة الناس أدوات جديدة وقوية للتصميم والإنتاج، وسيتمكن أصحاب الحسابات المتوسطة في البنوك من الحصول على نفس قدرة التصنيع والتصميم التي كانت حِكْرًا من قبلُ على المصممين المحترفين وشركات التصنيع الكبرى.

في عالم المستقبل المعتمد على الطباعة الثلاثية الأبعاد، سيصنع الناس ما يحتاجون إليه وقتَما يحتاجون إليه وأينما يحتاجون إليه. لكن التقنيات تكون مفيدة فقط حسب الغرض الذي يستخدمها الشخص من أجله؛ فربما يصنع الناس أسلحة وأدوية جديدة غير مرخصة أو حتى سامَّة، وربما تمتلئ بيئتنا بالقُمامة بسبب الأجسام البلاستيكية الجديدة والمطبوعة حسب الطلب، التي يتخلص الناس منها بنحو سريع. وسوف تجعل التحديات الأخلاقية للطباعة الحيوية الجدلَ حول الخلايا الجذعية يبدو بسيطًا عند مقارنته بها. أما تجار السوق السوداء، فسيقعون تحت إغراء كسب أرباح سريعة وبطرق غير مشروعة عن طريق صنع وبيع أجزاء آلات مَعِيبة، يمكن أن يؤديَ تركيبها الرديء إلى تعطلها في لحظات حرجة.

عندما يسمع معظم الناس عن الطباعة الثلاثية الأبعاد لأول مرة تقفز صورة الطابعة التقليدية مباشرة إلى أذهانهم. أكبر فارق بين الطابعة التي تنفث الحبر والطابعة الثلاثية الأبعاد هو فارق متعلق بالأبعاد؛ إذ تطبع الطابعة المكتبية بتقنية ثنائية الأبعاد عن طريق رش الحبر الملون على ورق مسطَّح، بينما تصنع الطابعة الثلاثية الأبعاد أجسامًا ثلاثية الأبعاد يمكنك حَمْلها في يدك.

تصنع الطابعات الثلاثية الأبعاد الأشياء باتباع تعليمات من كمبيوتر وتكديس الموادِّ الخام في طبقات. لفترة طويلة من التاريخ البشري، صنعنا أجسامًا مادية بتقطيع المواد الخام أو باستخدام قوالب لصنع أشكال جديدة.

الاسم التقني للطباعة الثلاثية الأبعاد هو «التصنيع بالإضافة»، وهو في الواقع اسم يصف عملية الطباعة الحقيقية بنحو أكبر. يتيح لنا أسلوب التصنيع الفريد الخاص بالطباعة الثلاثية الأبعاد صنع الأجسام بأشكال لم تكن ممكنة من قبلُ.

الطباعة الثلاثية الأبعاد ليست تقنية حديثة؛ فالطابعات الثلاثية الأبعاد تقوم بعملها في صمت منذ عقود في الورش التصنيعية. وعلى مدار السنوات القليلة الماضية، تطورت تقنية الطباعة الثلاثية الأبعاد بنحو سريع؛ بسبب التقدم في القدرة الحاسوبية وبرامج التصميم والمواد الخام الجديدة، ووقود الابتكار والإبداع الذي يسمى الإنترنت.



تبلغ تكلفة هذه الطابعة ١٠ آلاف دولار أمريكي وهي في حجم فرن المايكروويف (الصورة مهداة من شركة استراتاسيس).

تلعب أجهزة الكمبيوتر دورًا حيويًّا في عملية الطباعة الثلاثية الأبعاد؛ فمن دون التعليمات الآتية من أحد أجهزة الكمبيوتر، تتوقف الطابعة عن العمل. وهي تعمل فقط عندما تُغذى بمخطط إلكتروني مصمم بعناية، أو ما يسمى بملف التصميم، الذي يعطيها

تعليمات حول أماكن وضع المواد الخام. في الواقع، فإن الطابعة الثلاثية الأبعاد من دون كمبيوتر موصل بها وملف تصميم مصنوع بعناية تصبح بلا فائدة مثل جهاز آي بود من دون ملفات موسيقى.

تسير عملية الطباعة الثلاثية الأبعاد كما يلي: تتَّبع الطابعة إرشادات ملف التصميم، وتُخرج أو تصلد المادة الخام التي على هيئة مسحوق أو مادة ذائبة أو سائلة في نموذج محدد مسطح. بعد تماسك الطبقة الأولى، يعود «رأس الطباعة» الثلاثية الأبعاد لتشكيل طبقة رفيعة ثانية ووضعها فوق الأولى، وعندما تتماسك الطبقة الثانية، يضع رأس الطباعة طبقة ثالثة فوق الثانية. وفي النهاية تبدأ الطبقات في التراكم ليتكون الجسم الثلاثي الأبعاد.

لا تقطع الطابعات الثلاثية الأبعاد الأشياء أو تصبها في قوالب مثلما يفعل البشر أو آلات التصنيع التقليدية. ويتيح صنع الأجسام في طبقاتٍ القدرة على تجسيد نطاق أكبر من المفاهيم الرقمية، فإذا كان تصميم الجسم يحوي تجاويف داخلية دقيقة أو أجزاء متداخلة، فإن الطابعة الثلاثية الأبعاد ستكون هي أول آلة تصنيع يمكن أن تنفذ هذه التصميمات على أرض الواقع.

بدأت الأجزاء والمنتجات المطبوعة بتقنية ثلاثية الأبعاد في التسلل لحياتنا اليومية؛ فلوحة القيادة في السيارة تُصَمَّم بمساعدة نماذج أولية مطبوعة بتقنية ثلاثية الأبعاد للتأكد من أن كل مكوناتها المتعددة تتوافق معًا على نحو مناسب. وإذا كنت ترتدي سماعة مخصصة لضعف سمعك، فمن المحتمل أنها طُبعت بتقنية ثلاثية الأبعاد باستخدام نتائج مسح ضوئي حدد شكل أذنك الداخلية بدقة.

تطبع معامل الأسنان تيجان أسنان مخصصة في أقل من ساعة باستخدام صور الأشعة السينية، وتحوي أجساد العديد من الناس حول العالم رُكَبًا صناعية مطبوعة، مصنوعة من التيتانيوم والخزف. أما إذا حظيت بركوب طائرة بوينج الفاخرة الجديدة، دريم لاينر ٧٨٧، فقد ائتَمنت على الأقل ٣٢ جزءًا مختلفًا مطبوعًا بالتقنية الثلاثية الأبعاد على حياتك.

يمكن تلخيص سر الطباعة الثلاثية الأبعاد فيما يلي: الطابعات الثلاثية الأبعاد أكثر دقة ومهارة من أي أسلوب إنتاج آخر — سواء كان بشريًّا أو آليًّا — في تحويل التصميمات المعقدة لأجسام مادية عن طريق مزج المواد الخام بطرق لم تكن ممكنة من قبلُ.

اليوم، يمكن لأي طابعة ثلاثية الأبعاد منزلية عادية صنع أجسام بلاستيكية في حجم صندوق الحذاء، أما الطابعات الثلاثية الأبعاد الصناعية فيمكنها صنع ما يتراوح حجمه

ما بين السيارة ورأس الدبوس الذي لا يكاد يُرى بالعين المجردة. بعض الناس أنشَئوا طابعات ثلاثية الأبعاد مخصصة يمكنها إنتاج هياكل خرسانية كبيرة في حجم منزل صغير. وطبع باحثون آخرون أجسامًا على مستوًى مصغر للغاية، صانعين أجسامًا تُرى تفاصيلها بالكاد بالعين المجردة.

## (١-١) الرقمي (والتناظري)

في منتصف تسعينيات القرن الماضي، كانت التجارة الإلكترونية ووسائل الإعلام الرقمية في مهدهما. تنبأ نيكولاس نيجروبونتي — في كتابه الاستشرافي الرائع، الأعلى مبيعًا عامَ ١٩٩٥ «الكينونة الرقمية» — بزوال «الذرات الترفيهية»؛ فقبل سنوات من التحول الكبير للإعلام الرقمي، تنبأ نيجروبونتي على نحو صحيح بأن موفِّري الترفيه في هيئته المادية — ناشري الكتب الورقية ومحلات تأجير شرائط الفيديو وشبكات التلفزيون الكبرى — سينقرضون تمامًا مثل الديناصورات.

كان تراجع وسائل الإعلام ونشر الكتب الخاضعَين لإدارة مركزية مجرد بداية؛ فقد شهدت نهاية القرن العشرين تحوُّل المعلومات إلى الشكل الرقمي، وسيسعى القرن الحادي والعشرون للجمع بقوة بين العالَمين الافتراضي والمادي.

العالم الافتراضي هو عالم حر؛ حيث الجاذبية أمر اختياري؛ ففي ألعاب الفيديو، يمكن أن تقفز الشخصيات فوق الأبنية، وتنمو لها أذرع جديدة، وتتحول إلى أشكال مادية عديدة. العالم الافتراضي سهل التعديل والمراجعة؛ فمن المستحيل تغيير لون لحاء شجرة حقيقية لكن من الممكن بكل بساطة تحرير صورتها الرقمية. يمكن برمجة السلوك في العالم الافتراضي؛ فإذا حُددت تفاصيل جسم مادي في ملف تصميم، فإن «المادة الخام» الرقمية للتصميم تكون نمطية؛ أي إنها تتكون من أنماط ضوئية متمايزة بالغة الصغر على الشاشة أو ما تسمى البِكْسلات.

سوف تَسُدُّ تقنيات الطباعة الثلاثية الأبعاد الفجوةَ التي تفصل بين العالَمَين الافتراضي والمادي. بالطبع، سيبرز المتشككون ليوضحوا أن العالَمَين يلتقيان بالفعل في عدة نقاط؛ ففي نهاية الأمر، إن عمليتَي التصميم والتصنيع تقودهما أجهزة الكمبيوتر منذ عقود، وحاليًّا، أصبح الإنتاج الواسع النطاق آليًّا بنحو شبه تام (فيما عدا آخر خطوة، وهي خط التجميع الذي يُشرف عليه البشر بنحو مكثف).

ستكون عملية تلاقي العالَمين الافتراضي والمادي بطيئةً وصعبة، وستحدث على مراحل. في البداية سنتحكم في شكل الأجسام المادية، ثم سنكتسب مستويات جديدة من التحكم في تكوينها والمواد المصنوعة منها، وأخيرًا سنتحكم في سلوكها.

## التحكم في الشكل

يمكن للطابعة الثلاثية الأبعاد فهم ملف التصميم الرقمي بكل دقة؛ مما يقربنا خطوة من استغلال الكم الهائل من الحرية والإبداع المتوافرَيْنِ في العالم الافتراضي، فإذا شاهدت فيلم رسوم متحركة، فمن الواضح أن أي مشهد على الشاشة صُنع بالكمبيوتر؛ فهناك ديناصورات تتجول في محطات مترو الأنفاق الحديثة، وجنود آليُّون على هيئة صقور حوَّامة، قادرون على الطيران، ويُطلقون أشعة ليزر قاتلة على أي شيء يعترض طريقهم.

إذا تنقَّل الفيلم ذهابًا وإيابًا بين الواقع والرسوم المتحركة، فسيتضح للمُشاهد فورًا أن هناك فرقًا واضحًا بين عالم الكمبيوتر، الغني بالتفاصيل والناتج عن المُخَيِّلة الخصبة للعديد من الأشخاص، وبين الواقع. إحدى الطرق لإدراك الآفاق التي تُتيحها الطباعة الثلاثية الأبعاد والمخاطر التي تحيق بها هي تأمُّل الاستبداد والقوانين الجامدة التي تحكم العالم المادي، وبما أن الطابعة الثلاثية الأبعاد تبني الأشياء على شكل طبقات، فيمكنها صناعة أشكال كانت متاحة فقط في الطبيعة؛ إذ أصبحت المنحنيات والفراغات والفجوات الداخلية المعقدة ممكنة الصنع.

لكن التحدي يكمن في أن الذرات تجتمع معًا بطرق غير متوقعة. فيمكن لأي تصميم أن يبدوَ رائعًا على شاشة الكمبيوتر لكنه ينهار تمامًا بعد تصنيعه؛ لأنه غير قادر على مقاومة الجاذبية ومحدودية المواد الخام. على العكس، فإن العالم الرقمي يتيح لخيالنا مرونة وحرية إبداع كبيرتين، وهو يضم بحماس كبير أمورًا غير ممكنة في الواقع.

## التحكم في التكوين

في ثاني مراحل التقارب بين العالَمين الافتراضي والواقعي، ستتيح لنا الطباعة الثلاثية الأبعاد تحكمًا دقيقًا فيما تتكون منه الأشياء أو مكونات المواد الخام المصنِّعة لها. ستفتح الطابعات الثلاثية الأبعاد — العاملة بعدَّة أنواع من المواد الخام — البابَ لإنتاج أشياءَ

جديدة ومبتكرة. وهذا النوع الجديد من المنتجات سيُصنع عن طريق مزيج دقيق من المواد الخام التي يتفوق دمجها في كل واحد على مجموع أجزائها معًا.

تخيَّل عُلبة ألوان مائية يمكن فيها خلط اللون الأزرق بالأصفر لإنتاج درجات لا نهائية من اللون الأخضر. في الطبيعة، يتحد ٢٢ حمضًا أمينيًّا بطرق مختلفة لتكوين أشكال مختلفة من البروتينات، والطابعة الثلاثية الأبعاد التي تعمل بمواد خام متعددة، والمزودة بتعليمات محددة عبر ملف تصميم، ستكون قادرة على دمج مواد خام تقليدية معًا لتخرج تكوينات جديدة.

عندما تتطور تقنية الطباعة الثلاثية الأبعاد، سنشهد صنع أجسام عن طريق مزج للمواد يستحيل حدوثه في الوقت الحاليِّ؛ سنرى أجزاء آلات يمكنها العمل مرة أخرى بعد تعطلها، أو شبكة يمكنها التمدد لِما يصل إلى عشرة أمثال طولها الحقيقي، وستستجيب الأجهزة الطبية لفصيلة دم المريض أو تكتشف أي تغير في درجة الحرارة.

يكمن السبيل الثاني للتحكم في التكوين في اتجاه مغاير قليلًا؛ فستصبح الطابعات الثلاثية الأبعاد قادرةً في يوم ما على صنع مواد خام يمكن التحكم فيها؛ ففي العالم الافتراضي، كل المعلومات مهما كانت معقدة تعود في الأساس إلى جوهرها المجرد، الذي يتكون من وحدتين أساسيتين: إما الواحد أو الصفر.

على العكس، فإن الأجسام المادية تتكون من دوامات غنية وغير نمطية من المواد الخام التي تتكون من الذرات كوحدات أساسية لها، والتي يصعب السيطرة عليها والتحكم فيها. وبسبب وجود هذا التنوع في المواد الخام في العالم المادي، فإن المواد «التناظرية» يصعب التقاطها في هيئة رقمية بنحو مفيد؛ ونتيجة لهذا، فإن المواد التناظرية يصعب نسخها والتحكم فيها وبرمجتها بدقة.

تُعتبر الذرات المتنافرة كابوسًا لأي مُصنِّع. هذا حقيقي؛ فالطابعة الثلاثية الأبعاد لا يمكنها تفكيك الذرات لجعلها أكثر مُطاوَعة، لكن ما يمكن لهذه الطابعة القيام به هو المزج بمهارة بين المواد الخام التي كانت متنافرة لتخرج على هيئة جسم واحد مطبوع.

من المعروف عن الدوائر الإلكترونية أنه يجب صنع أجزائها المعدِنية أولًا بنحو منفصل عن أجزائها البلاستيكية والخزفية قبل أن تُجمع لاحقًا. وفَرضت حقيقةُ أنه يجب تصنيع المواد الخام المكوِّنة للأجزاء الحساسة من هذه الدوائر بآلات تصنيعية منفصلة، أن تكون هذه الدوائر مسطحة ومصنوعة من طبقات رقيقة عدة.

لو لم تكن مكونات الدوائر الإلكترونية تعاني من لعنة التنافر، لاستطعنا صنعها بكل الأشكال والهيئات، لكن إذا كان يمكننا الدمج بين المواد الموصِّلة وغير الموصِّلة معًا في طابعة ثلاثية الأبعاد؛ فيمكننا صنع دوائر بكل الأشكال والمقاسات. ويمكننا طباعة أجهزة ميكانيكية بدوائر مضمنة داخلَها سلفًا، تنافس في تعقيدها العالم البيولوجي.



طباعة ثلاثية الأبعاد متعددة المواد في مراحلها الأولى. هذه اللعبة في الواقع مشروع هندسي معقد مصنوع من العديد من المواد الخام المختلفة التي تم دمجها معًا خلال عملية الطباعة (الصورة مهداة من شركة أوبجيت).

طريقة أخرى للسيطرة على تكوين المواد الخاصة بالأجسام المطبوعة هي تحويلها إلى فوكسلات، وهي المقابل المادي للبكسلات. يمكن أن تكون تلك الفوكسلات أجزاءً متمايزة بالغة الصغر من مادة صُلبة، أو يمكن أن تكون حاويات بالغة الصغر تحمل أي شيء تضعه فيها.

ما زلنا في طور تعلُّم طباعة الأجسام الثلاثية الأبعاد المصنوعة من الفوكسلات، وستتيح هذه الأجسام بديلًا للمواد التناظرية التي تُكوِّن معظم الأشياء الملموسة. وإذا كان يمكنك صنع شيء من الفوكسلات، فقد اقتربت خطوة من جعله يتصرف كما لو كان جسمًا مبرمجًا والسيطرة على ما يقوم به؛ فالتحكم في تكوين الأجسام الملموسة يفتح الباب للمرحلة التالية؛ وهي التحكم في سلوك هذه الأجسام المادية.

## التحكم في السلوك

تأمَّل أي طاولة مطبخ خشبية، إذا كنت قادرًا على مسح أسطحها الخارجية باستخدام الماسح الضوئي، فيمكنك تحويل هذه البيانات لملف تصميم، وبمجرد تحويل أبعاد الطاولة المادية لصيغة رقمية بنجاح، يمكن حينها بسهولة التحكم الكامل بنحو مؤقت في تصميم الطاولة باستخدام برنامج تصميم.

يمكنك تحرير ملف تصميم الطاولة، ثم طباعة نسخة جديدة من الطاولة على نحو ثلاثي الأبعاد. على الرغم من ذلك، فإنك ما لم تطبع الطاولة الجديدة باستخدام مليارات الفوكسلات بالغة الصغر، فإنها ستظل تناظرية؛ أي إن المواد المصنَّعة منها والأجزاء والقطع المكوِّنة لها ستظل جامدة وغير ذكية وثابتة وخاملة؛ أما إذا كان يمكنك طباعة الطاولة الجديدة على نحو ثلاثي الأبعاد باستخدام الفوكسلات، فسينبثق أمامك عالم جديد من الاحتمالات.

ومع استمرار حجم المكونات الإلكترونية في الانخفاض وزيادة قدرتها الحاسوبية، سنقدر في يوم ما على الطباعة الثلاثية الأبعاد لفوكسلات تحوي دوائر بالغة الصغر. ومثل البكسلات التي يُكوِّن اتحادها المثالي والمتقن صورة رقمية جميلة عالية الجودة، فإن الاتحاد المثالي والمتقن للفوكسلات يمكن أن يصنع أجسامًا ملموسة ثلاثية الأبعاد تتميز بالذكاء والفاعلية.

تتيح الفوكسلات صنع مواد خام ذكية ونشطة؛ فبدلًا من طباعة أجزاء ثلاثية الأبعاد سلبية كما نفعل اليوم، سنقدِر في المستقبل على طباعة أنظمة نشطة — على سبيل المثال هاتف محمول عامل — وستَصنع الطابعات الثلاثية الأبعاد أقمشةً ذكية، وأنواعًا مختلفة من الروبوتات الجاهزة، وآلات قادرة على التعلم والاستجابة والتفكير. وسنطبع أشياءَ ملموسة تملك ذكاء الأشياء الرقمية.

يومًا ما، ستتيح الطباعة الثلاثية الأبعاد نقل الذكاء الاصطناعي من الكمبيوتر إلى أرض الواقع، وستصبح الروبوتات والسايبورجات أثرًا ثقافيًّا قديمًا من تسعينيات القرن الماضي. يكمن المستقبل في المادة القابلة للبرمجة، المواد الخام التي يمكن برمجة سلوكها وطباعتها، بنحو ثلاثي الأبعاد في شكل محدد.

تنبأ نيل جيرشينفيلد، الأستاذ بمعهد ماساتشوستس للتكنولوجيا، في كتابه «عندما تبدأ الأشياء في التفكير» بأن المادة القابلة للبرمجة ستمتلك عقلًا خاصًّا بها.[1] وعندما تبدأ الأشياء في التفكير، فإن قوة المعالجة الرقمية سينمو لها ساقان لتمشيَ على أرض الواقع،

وستَصنع المواد القابلة للبرمجة والمطبوعة بنحو ثلاثي الأبعاد جسدًا ملموسًا خاصًّا بها مكتمل القدرات الميكانيكية والملموسة.

ربما في يوم ما تخرج روبوتات مطبوعة بنحو ثلاثي الأبعاد من الطابعة وهي تحوي بالفعل بطاريات ومستشعرات ودماغًا تتكون من العديد من الدوائر الإلكترونية. ستتحسس تلك الروبوتات الوليدة طريقها مترددة خارج عالم الطباعة، وتُشغِّل نظام دوائرها الإلكترونية لمعرفة طريقها في عالم الواقع. وربما ستعود تلك الروبوتات يومًا ما لطابعتها لإضافة سمات جديدة «لآلة الولادة خاصتها» من أجل فحص الأجزاء المطبوعة أو إعادة معايرتها أو استبدالها.

## (١-٢) إرسال الأجسام المادية بالفاكس

إن التلاقيَ الحقيقي بين العالَمَين الواقعي والافتراضي سيحدث عندما نقدر بكل سهولة على تغيير الشكل بين المحسوس والافتراضي؛ عندما يمكن للأجسام المادية التحول بسلاسة من بِتَّات إلى ذَرَّات، ومن ذَرَّات إلى بِتَّات. وبنفس الطريقة التي يُطبَع بها مستند رقمي على الورق ثم يُمسَح ضوئيًّا ثم يُطبَع مرة أخرى، فستقدِر الأجسام المادية يومًا ما على التحول من بِتَّات إلى ذَرَّات والعكس.

حذر نيجروبونتي، في كتابه «الكينونة الرقمية»، من أن العالم المحسوس لن يتحول بسهولة إلى هيئة رقمية؛ فالذرات ثقيلة ونقلها مكلف، كما أن الأشياء المادية تحتاج لمساحات لتخزينها، وتصر الذرات بنحو عنيد على التمسك بعضها ببعض بطرق محددة بدقة وصرامة.

كتب نيجروبونتي يقول: «إذا كنت تصنع سترات من الكشمير أو طعامًا صينيًّا، فسيمر وقت طويل قبل أن ننجح في تحويلهما إلى بِتَّات. إن جملة «انقلنا فورًا يا سكوتي» [من مسلسل الخيال العلمي ستار تريك] حلم جميل، لكنه لن يتحقق قبل مرور قرون عديدة. وحتى ذلك الحين، يجب عليك الاعتماد على خدمات فيديكس والدراجات والأحذية الرياضية لنقل ذراتك من مكان لآخر.»[2]

ربما تصبح الطابعاتُ ثلاثية الأبعاد يومًا أجهزةَ فاكس متميزة. إذا أصبح العالَمان الافتراضي والمادي بحق غير منفصلَيْنِ، فيمكننا نقل الأجسام المادية من مكان لآخر بأقل مجهود. منذ سنوات مضت، عندما كنتُ طالبًا حديث التخرج، كان بعض زملائي يعملون

بجد لمعرفة كيفية القيام بهذا. كانوا يطورون تقنيات للمسح الضوئي، ويختبرون دقتها على طابعة ثلاثية الأبعاد قديمة.

أعجبتني رؤيتهم، والتي ما زالت حتى اليوم سابقة لزمنها بعقود. لكن بحسب علمي، فإنهم لم يقدِروا على تجاوز بعض التحديات الرئيسية. أولًا: إن الماسحة الضوئية تلتقط فقط تفاصيل أسطح الأجسام التي يحتوي معظمها على بناء داخلي مهم. ثانيًا: إن زملائي السابقين تمكنوا فقط من طباعة أجسام جامدة بسيطة مصنوعة من مادة واحدة فقط.

اليوم، يمكننا إرسال أجسام مادية بسيطة عبر طابعة ثلاثية الأبعاد تمامًا وكأنها جهاز فاكس. عملت على مشروع مع زميل لي يعمل أستاذًا للآثار، يفك شفرات ألواح مِسْمارية تعود لآلاف السنين. دائمًا ما يأخذه بحثه إلى مواقع أثرية في دول عدة في الشرق الأوسط.

عاد زميلي مؤخرًا من رحلة للخارج منزعجًا من عدم قدرته على العودة إلى وطنه بأي معلومات مفيدة. تُعتبر الألواح المِسْمارية ذات قيمة، ويقوم من يعثر عليها بتسليمها على الفور لحكومات البلد التي يستخرجها منها، ويحاول علماء الآثار التقاط أكبر قدر من التفاصيل عن طريق التصوير ونسخ شكل الحروف بمثابرة، لكن التحدي يكمن في أنه لا يوجد ما يضاهي الجسم الحقيقي.

قررنا أنا وزميلي القيام بتجرِبة لمعرفة هل كان يمكننا «إرسال» ألواح مِسمارية لا تُقدَّر بثمن من مكان لآخر عبر طابعة ثلاثية الأبعاد. اتفقنا على إمكانية إجراء تصوير مقطعي لبعض تلك الألواح التي كانت في حوزته، ثم تحويل بيانات المسح إلى ملف تصميم، وإعادة إنشاء نسخة طبق الأصل من الألواح من خلال طابعة ثلاثية الأبعاد.

تصورنا أنه إذا نجحت تجرِبتنا فإنه يمكن لزميلي عند سفره إلى الخارج في المرة القادمة أن يقنع السلطات المحلية أن يصور الألواح المسمارية الثمينة مقطعيًّا، ثم يكون عليه إرسال معلومات التصميم لطابعة ثلاثية الأبعاد — سواء أكانت قريبة منه أم بعيدة — لمشاركتها مع أي شخص آخر على سطح الكوكب. ويمكنه عرض خدمة حفظ لا تُقَدَّر بثمن للبلد المضيف كذلك، حيث إنه يمكنهم تخزين بيانات التصوير المقطعي والنُّسخ الثلاثية الأبعاد أيضًا.

اكتشفنا أن إرسال تلك الألواح عبر الطابعة سهل على نحو مفاجئ؛ فقد حولنا أولًا بيانات التصوير المقطعي لملف تصميم، ثم طبعنا نسخًا طبق الأصل بنحو ثلاثي الأبعاد من الألواح النادرة والثمينة، بمقاسات مختلفة ومواد خام متنوعة.



الآثار التي لا تُقَدَّر بثمن المصورة تصويرًا مقطعيًّا يمكن طباعتها بنحو ثلاثي الأبعاد للحفاظ عليها ومن أجل الأغراض التعليمية. على اليسار الجسم الأصلي، وعلى اليمين نسخة طبق الأصل منها مطبوعة بتقنية ثلاثية الأبعاد. الصورة السفلى صورة مكبرة من النسخة طبق الأصل للجسم (الصورة مهداة من جامعة كورنيل – الأمين: ديفيد آي أوين؛ التصميم: ناتاشا جانجي؛ التصوير: جيسون كوسكي).

أفضل ما في الأمر أننا اكتشفنا خلال التجرِبة ميزة إضافية، وهي أن التصوير المقطعي التقط الحروف المحفورة على الجوانب الداخلية والأسطح الخارجية للألواح. أدرك الباحثون منذ قرون أن العديد من هذه الألواح تحمل رسائل مكتوبة داخل تجاويفها الداخلية. مع ذلك — وحتى الآن — فإن الطريقة الوحيدة لقراءة هذه الرسائل هي كسر — وبالتالي تدمير — اللوح، وأحد فوائد التصوير المقطعي والطباعة الثلاثية الأبعاد لنسخة طبق الأصل من تلك الألواح، أنه يمكنك بكل أريحية كسر النسخة المطبوعة وقراءة ما بداخلها.

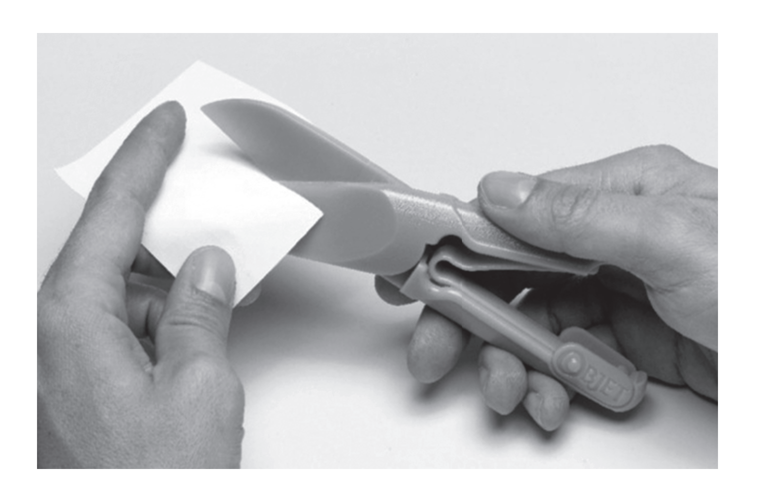
## (٢) المبادئ العشرة للطباعة الثلاثية الأبعاد

التنبؤ بالمستقبل أمرٌ غامض، وأثناء كتابتنا لهذا الكتاب ومقابلاتنا مع بعض الأشخاص حول الطباعة الثلاثية الأبعاد، اكتشفنا بعض «القواعد» الضمنية التي ظلت تظهر لنا.

وقد وصف الكثير من الأشخاص، من نطاق عريض ومتنوع من الصناعات والخلفيات ومستويات الخبرة، طرقًا متشابهة ساعدتهم فيها الطباعة الثلاثية الأبعاد في تجاوز عقبات أساسية تتعلق بالتكاليف والوقت والتعقيد.

لخصنا ما تعلمناه في العشرة المبادئ التالية، ونأمل أن تساعد الأشخاص والأعمال على حد سواء على الاستفادة بنحو كامل من تقنيات الطباعة الثلاثية الأبعاد.

**المبدأ الأول: تعقيد الصنع لا يكلف مالًا:** في التصنيع التقليدي، كلما زاد شكل الجسم تعقيدًا، زادت تكلفته. أما بالنسبة إلى الطابعات الثلاثية الأبعاد، فإن التعقيد يكلف نفس ما تكلفه البساطة؛ فصنع أجسام مزخرفة ومعقدة لا يتطلب المزيد من الوقت أو المهارة أو التكلفة أكثر من طباعة مكعب بسيط. ومجانية التعقيد هذه ستُخل بتوازن نماذج التسعير التقليدية، وتغير كيفية حسابنا لتكلفة صنع الأشياء.



مثال على طباعة أجسام مفيدة؛ فهذا المقص المطبوع على نحو ثلاثي الأبعاد يُستخدم مباشرة بعد صنعه، دون حاجة لتجميعه أو شَحْذه.

**المبدأ الثاني: التنوع مجاني:** يمكن لطابعة واحدة ثلاثية الأبعاد صنع العديد من الأشكال؛ فمثل الحرفي البشري، يمكن للطابعة صنع شكل مختلف كل مرة. الآلات التقليدية أقل تنوعًا بكثير، وتُصَنِّع نطاقًا محدودًا من الأشكال. تلغي الطباعةُ الثلاثية

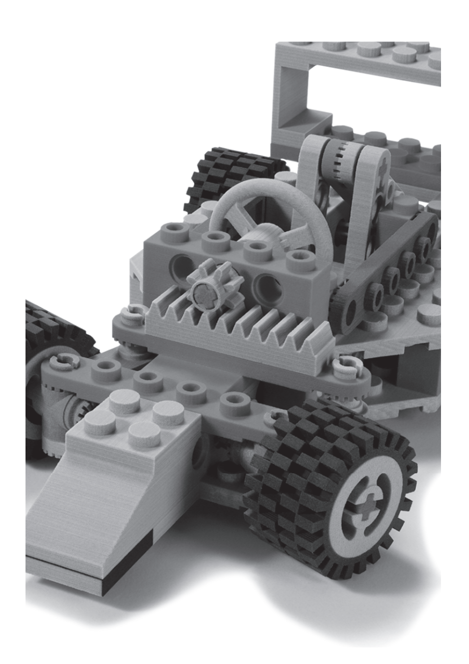
الأبعاد التكاليفَ الإضافية المتعلقة بإعادة تدريب عمال الآلات أو إعادة تجهيز آلات المصنع؛ فأي طابعةٍ ثلاثية الأبعاد تحتاج فقط لمخطط رقمي مختلف، ومجموعة جديدة من المواد الخام.

**المبدأ الثالث: لا حاجة للتجميع:** تُنتج الطباعة الثلاثية الأبعاد قطعًا متداخلة. على العكس، يقوم التصنيع الواسع النطاق على خط التجميع؛ ففي المصانع الحديثة، تصنع الآلات أجزاءً متطابقة يُجَمِّعها معًا لاحقًا العمال أو الروبوتات، ويحدث هذا أحيانًا في قارَّات بعيدة. وكلما زادت الأجزاء التي يحتويها الجسم، زادت تكلفة إنتاجه وزاد وقت تجميعه. لكن عن طريق صنع الأشياء بمُراكمة الطبقات، يمكن لأي طابعة ثلاثية الأبعاد طباعة باب بمُفَصَّلات متداخلة في نفس اللحظة من دون الحاجة لأي تجميع. وتقليل التجميع سيؤدي إلى قصر سلاسل التوريد؛ مما يوفر المال المدفوع للعمال والنقل، كما أن قِصَر سلاسل التوريد سيؤدي إلى تقليل التلوث المنبعث منها.

**المبدأ الرابع: لا يوجد وقت إنتاج:** يمكن للطابعة الثلاثية الأبعاد طباعةُ الأشياء حسب الطلب عند الاحتياج لها، وهذا التصنيع الفوري يقلل حاجة الشركات للتخزين المادي للسلع، وسيؤدي هذا إلى ظهور أنواع مختلفة من الخدمات؛ حيث ستتيح الطابعة الثلاثية الأبعاد إمكانية صنع أجسام مخصصة عند الطلب استجابةً لطلبات العملاء. وانعدام وقت الإنتاج يمكنه تقليل تكاليف الشحن لمسافات طويلة إذا صُنِعت الأجسام المطبوعة عند الحاجة إليها، وبالقرب ممن يحتاج إليها.

**المبدأ الخامس: فضاء التصميم لا نهائي:** يمكن للحرفيين وتقنيات التصنيع التقليدية صنع عدد محدود فقط من الأشكال؛ فقدرتنا على صنع الأشكال محدودة بالأدوات المتاحة لنا. على سبيل المثال، إن مِخْرَطة الخشب التقليدية يمكنها صناعة أجسام دائرية فقط، وآلة التفريز يمكنها فقط صنع أجزاء يمكن استخدامها من قبل عدة التفريز، أما آلة القَوْلَبة فيمكن فقط أن تصنع أشكالًا يمكن صَبُّ الأشياء فيها ثم استخراجها منها. وتتيح الطابعةُ ثلاثية الأبعاد القضاءَ على كل هذه العقبات؛ مما يتيح فضاء تصميم جديدًا وواسعًا، ويمكنها صنع الأشكال التي لا توجد حتى الآن إلا في الطبيعة فقط.

**المبدأ السادس: لا حاجة لمهارة في التصنيع:** يتدرب الحرفيون التقليديون لسنين لاكتساب المهارات التي يحتاجون إليها في عملهم، ويقلل الإنتاجُ الواسع النطاق وآلاتُ التصنيع المعتمدة على الكمبيوتر الحاجةَ للإنتاج المعتمد على العمال المَهَرة. مع ذلك،



هذه الأجزاء البلاستيكية الظاهرة في الصورة تبدو كما لو كانت مكعبات مجمعة لكنها في الحقيقة مطبوعة ومجمعة سلفًا في أمر طباعة واحد (الصورة لسيارة مطبوعة بطابعة زي برينتر ٦٥٠، ومهداة من شركة ثري دي سيستمز).

فإن آلات التصنيع التقليدي ما زالت تحتاج إلى خبير ماهر لتعديلها ومعايرتها. تحصل الطابعةُ الثلاثية الأبعاد على معظم إرشاداتها من ملف تصميم؛ فلصنع جسم ما بتعقيد متساوٍ، تحتاج تلك الطابعة إلى مهارات تشغيل أقل مما تحتاج إليه آلة القَوْلبة بالحَقن. ويفتح هذا النوع من التصنيع نماذج عمل جديدة، ويمكن أن يتيح أساليب إنتاج جديدة للناس في البيئات البعيدة أو الظروف القاسية.

**المبدأ السابع: التصنيع مدمج ومتنقل:** بِناءً على حجم مساحة الإنتاج، فإن الطابعة الثلاثية الأبعاد تمتلك قدرة تصنيعية أكبر من آلة التصنيع التقليدية. على سبيل المثال، إن آلة القولبة بالحَقْن يمكنها فقط صنع أجسام أصغر بنحو كبير من حجمها. على العكس، فإن طابعة ثلاثية الأبعاد يمكنها صنع أجسام كبيرة في حجم سرير الطباعة

خاصتها، وإذا ضُبطت الطابعة لتتحرك آلةُ الطبع خاصتها بنحو حر، فيمكنها صنع أجسام تَفُوقها في الحجم. وتَجعل القدرةُ الإنتاجيةُ العاليةُ للقدم المربع الواحد من الطابعات الثلاثية الأبعاد اختيارًا مثاليًّا للاستخدام المنزلي أو المكتبي لأنها تَشْغَل حيزًا صغيرًا.

**المبدأ الثامن: المخلفات الثانوية أقل:** تخلِّف الطابعات الثلاثية الأبعاد، التي تعتمد على المعادن، مخلفاتٍ ثانويةً أقل مما تخلفه نظيرتها من تقنيات التصنيع التقليدية التي تخلف كميات كبيرة تقدَّر بنسبة تسعين بالمائة من المعادن الأصلية التي ينتهي بها الحال مُلقاة على أرض المصنع، أما الطابعات الثلاثية الأبعاد، فأقل إضاعةً للمواد الخام في تصنيع المعادن. وبتطور مواد الطباعة، فإن عملية تصنيع الأجزاء بشكلها النهائي مباشرة دون المرور بمراحل وسيطة من الممكن أن تصبح طريقة لصنع الأشياء أكثر صداقة للبيئة.

**المبدأ التاسع: هناك أنواع لا نهائية من المواد:** المزج بين العديد من المواد الخام المختلفة في منتَج واحد أمر صعب باستخدام آلات التصنيع الحالية، وبما أن آلات التصنيع التقليدية تقسم أو تقطع أو تصنع قوالبَ لصنع الأشكال المحددة، فإن تلك العمليات لا يمكنها المزج بسهولة بين مواد خام مختلفة. وبتطور مجال الطباعة الثلاثية الأبعاد ذات المواد الخام المتعددة، سنكتسب القدرة على المزج بين أنواع مختلفة من المواد الخام. وهذا المزج، الذي لم يكن متاحًا من قبلُ بين المواد الخام، يتيح لنا مجموعةً أكبر بكثير — وغير مستكشفة في الكثير من الأحيان — من المواد الخام بخواص جديدة أو سلوكيات مفيدة.

**المبدأ العاشر: الاستنساخ المادي دقيق:** يمكن استنساخ ملف موسيقي رقمي بنحو لا نهائي من دون فقدان جودة الصوت. وفي المستقبل، فإن الطباعة الثلاثية الأبعاد ستنقل الدقة الرقمية هذه لعالم الأجسام المادية، وستتيح تقنيتا المسح الضوئي والطباعة الثلاثية الأبعاد معًا التنقلَ عاليَ الدقة بين العالَمين الرقمي والمادي، وسنتمكن من مسح وتحرير ونسخ الأجسام المادية لصنع نُسَخ طبق الأصل منها أو تحسين الجسم الأصلي.

بعض هذه المبادئ تحقَّق بالفعل في عالمنا اليوم، وهناك مبادئ أخرى سوف تتحقق على مدار العقد أو العقدين أو الثلاثة القادمة. وبالتخلص من قيود التصنيع التقليدية



طُبع كعب الحذاء هذا المصنوع من التيتانيوم قطعة واحدة (الصورة مهداة من شركة كيري لوفت).

القديمة، فإن الطباعة الثلاثية الأبعاد تفتح الباب لشلال متدفق من الإبداع. في الفصول التالية، سنستكشف كيف ستغير تقنيات الطباعة الثلاثية الأبعاد الطرق التي نعمل ونأكل ونُعالج ونتعلم ونصنع ونلهو بها. دعونا نبدأ بزيارة لعالم التصنيع والتصميم؛ حيث تقلل تقنيات الطباعة الثلاثية الأبعاد من السلطة الاستبدادية لاقتصادات الحجم.

الفصل الثالث

# التصنيع الذكي: جيد وسريع وقليل التكلفة

في ورشة الميكانيكي خاصتي، هناك لافتة ملصقة بالقرب من آلة دفع النقود مكتوب عليها: «يمكنك الحصول على الخدمة بنحو جيد أو سريع أو قليل التكلفة، اختر اثنين فقط.» هذه الطُّرفة الدائمة تلخص الأمر بِرُمَّتِه، لكن ماذا إذا كان هذا الميكانيكي مخطئًا؟

على الجانب الآخر من العالم، يبيع أحد المصانع فُرش أسنان الأطفال بعشرة سنتات للقطعة الواحدة. يستخدم هذا المصنع آلات متقدمة وتِقْنِيين مدرَّبين. يبدو هذا جيدًا؛ إذ إنه يقدِّم منتجات عالية الجودة، ويُنتج يوميًّا أكثر من ٣٠٠ ألف فرشاة، وهذا سريع.

هل يعني هذا أن ميكانيكي سيارتي العجوز المستفزة كان مخطئًا رغم كل شيء؟ ربما يمكنك الحصول على شيء بنحو جيد وسريع وقليل التكلفة، من دون أي تضحيات. لكن ربما لم يكن مخطئًا؛ فهناك جوانب أخرى للقصة أكثر تعقيدًا مما يبدو.

يحفل الإنتاج الواسع النطاق بتكاليف غير مباشرة وتأخيرات في مواعيد التسليم، وإذا نظرت إلى الصورة الكبرى من منظور أي شركة بدلًا من منظور المستهلك، فإن هذا النوع من الإنتاج ليس قليل التكلفة، وكذلك فإن عملية تحويل فكرة أي تصميم لمنتَج يُنتج بكَميات كبيرة ليست سريعة على وجه الخصوص. وإذا كنت لا ترغب إلا في منتَج يفي بأقل المتطلبات الشائعة؛ فهذا يعني أن السلع المنتجة بكَميات كبيرة ليست جيدة بوجه خاص أيضًا.

التصنيع الواسع النطاق بدفعات صغيرة مصطلح فيه تضاد لفظي؛ فكلما انخفض سعر المنتج النهائي للعميل، زادت أهمية زيادة حجم مبيعاته للشركة، وهذا ما يدفع المصنع المنتِج لفُرش الأسنان — الذي يريد استعادة المبلغ الذي استُثمر في إنتاج فرشاة الأسنان البسيطة — إلى بيع منتجاته التي أُنتجت على نطاق واسع بدفعات كبيرة. أقل عدد لأي طلب يصل إلى ٢٨ ألف فرشاة.

هناك تكلفة أخرى غير مباشرة تتعلق بعملية تصميم المُنتَج. فإنتاج المصانع لا يرحم، وتحويل فكرة أي تصميم لمنتَج سيُنتَج بأعداد كبيرة يشبه التضحيات التي تحدث لتحويل رواية أدبية معقَّدة لفيلم جماهيري ضخم؛ فحتى ملف التصميم البسيط الخاص بفرشاة الأسنان البلاستيكية (الذي بدا جيدًا على شاشة الكمبيوتر) سيتصرف على نحو غير متوقع عندما يخضع لقسوة وشدة عملية القولبة البلاستيكية المستخدمة في المصانع. كذلك، فإن قوانين الاقتصاد لا ترحم، وأفكار التصميم الجديدة تخضع لمقايضات إجبارية بين جودة المنتج وتكلفة التصنيع.

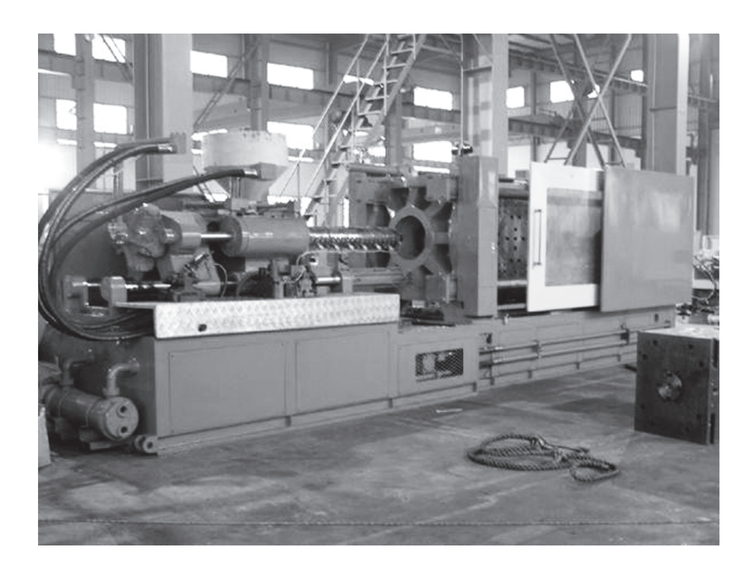
إن المصنع وخط التجميع طريقة مثالية لإنتاج منتجات متطابقة بأعداد كبيرة بتكلفة أقل. ومع ذلك، فإن هذه الكفاءة في الإنتاج ليست قليلة التكلفة؛ فخلف أي منتج بلاستيكي بسيط مُنتَج بأعداد كبيرة، هناك عاملون مستترون بالآلاف. ويجب على الشركات استثمار أموالها في تشغيل تقنيين ومهندسين مَهَرة لتحويل أي تصميم لواقع بشكل مناسب، ولضبط آلات المصنع، والإشراف على خطوط التجميع.

في قلب هذه المعضلة الخاصة بالجودة أو السرعة أو قلة التكلفة، هناك قاعدة اقتصادية أساسية تُسَمَّى اقتصادات الحجم. تُعَد اقتصادات الحجم الأساس الخفي الذي يقوم عليه اقتصادنا الصناعي الحديث؛ فهي ما يجعل إنتاج المنتجات بأعداد كبيرة مربحًا.

تقلل اقتصادات الحجم من السعر الذي يحصل به المستهلك على المنتجات المنتجة بأعداد كبيرة، وتزيد أرباح الشركة. على الرغم من ذلك، ولاستعادة الاستثمارات الأولية الخاصة بالتصميم والإنتاج، يجب على الشركات بيع كَميات ضخمة من نفس المنتج. وبعد بيع عدد كبير من نفس المنتج، تبدأ الشركة في الحصول على أرباح من استثمارها الأوليِّ فيه.

إحدى أكبر التكاليف غير المباشرة للإنتاج بأعداد كبيرة هي التضحية بالتنوع؛ فمن أجل التمتع بفوائد اقتصادات الحجم، يجب على أي شركة مقاومة إغراء تغيير تصميم المنتج، إلا إذا كان هناك سوق كبيرة يوفر فرصةً لتبرير هذا الاستثمار؛ إذ إن كل تغيير في التصميم — كل تحديث أو تنويع صغير — سيؤثِّر على المحصلة النهائية.

إن الإنتاج الواسع النطاق لا يمكن أن يتيحَ لكل من الشركات والعملاء منتجات جيدة وسريعة ورخيصة. ماذا عن إنتاج الحرفيين؟ الحرفيون المَهَرة يصنعون منتجات مخصصة على دفعات قليلة، ولا يحتاجون لخط تجميع أو استثمارات في مصانع، وهم لا يستأجرون فريقًا ماهرًا من المصممين والمهندسين والتقنيين. وإذا تأكد وجود عيب فادح



آلة قولبة بالحقن في أحد المصانع. تصنع هذه الآلات أجزاءً بلاستيكية بسرعة وتكلفة أقل لكن صناعة القالب تتطلب استثمارًا أوليًّا، وتتضمن تحديات في التصميم (الصورة مهداة من شركة كين بلاس).

في فكرة تصميم بعد تحويلها إلى صورتها المادية، فربما يحتاج الحرفي إلى تحمُّل تكلفة المواد الخام المبددة. على الرغم من ذلك، وبما أنه أُنتج منتج مَعِيب واحد فقط، فإن الحرفي يمكنه تعديل التصميم الأصلي بسرعة من دون الحاجة لمواجهة التبعات المالية للتخلص من المئات (أو الآلاف) من المنتَجات المَعِيبة، أما عن الجانب السلبي لإنتاج الحرفيين، فهو أنه لا يمكن القيام به على نطاق واسع.

## (١) طريق وسط بين الإنتاج الواسع النطاق والإنتاج الحِرَفي

يتميز الإنتاج الواسع النطاق بالكفاءة؛ مما يؤدي إلى زيادة أرباح الشركات وتخفيض الأسعار للمستهلك، لكن اقتصادات الحجم تؤثِّر على تنوع المنتج وتخصيصه. على العكس، فإن إنتاج الحرفيين يتعامل مع مسألة التنوع والتخصيص لكن الإنتاج يكون على

دفعات قليلة. تتيح تقنيات الطباعة الثلاثية الأبعاد طريقًا جديدًا بالمزج بين الإنتاج الواسع النطاق والإنتاج الحرفي.

عندما اكتُشف خُلد الماء لأول مرة، ظن المكتشفون أنه خدعة أو أن صانعًا للمقالب حاك حيوانًا مغطًّى بالفراء بمِنقار بطة وبأقدامٍ ذات وترات كأقدام الإوَزِّ وبجراب كجراب الكنغر. إن الطباعة الثلاثية الأبعاد هي خُلد الماء في عالم التصنيع؛ بدمجها بين الدقة الرقمية وقابلية التكرار الخاصة بالمصانع وحرية الحرفي في التصميم.

مثل أي آلة في مصنع، فإن الطابعة الثلاثية الأبعاد آلة أوتوماتيكية؛ إذ يُرشدها ملف تصميم رقمي خلال خطوات عملها، ويحصل هذا الملف بسرعة على تعليمات التصنيع الخاص بمنتج خاص، وهذه المعرفة يمكن حفظها أو إرسالها بالبريد الإلكتروني لأي مكان.

ومثل الحرفي البشري، فإن الطابعة الثلاثية الأبعاد متنوعة المهارات؛ فيمكنها صنع نطاق كبير ومتنوع من الأنواع المختلفة من الأشياء من دون الحاجة لاستثمار أولي ضخم. كما أن تكلفة طباعة ألف منتج مختلف أو متطابق واحدة لا تتغير، وتكلفة التخصيص تختفي تقريبًا.

بالرغم من هذه الميزات، فإن التصنيع بالطباعة الثلاثية الأبعاد لا يتيح تحقيق اقتصادات الحجم؛ فكأي سمة شخصية متطرفة، فإن حقيقة أن الطباعة الثلاثية الأبعاد تفشل في تحقيق اقتصادات حجم تُعَد نقطة ضعفها الكبرى، لكنها أيضًا أكبر نقاط قوتها. صحيح أن تحقيق اقتصادات الحجم أمر مهم لأي شركة يقوم نموذج عملها على بيع أعداد كبيرة من منتج سلعي يعود بهوامش ربح ضئيلة جدًّا؛ لكن إذا كان نموذج عمل الشركة قائمًا على بيع عدد صغير من المنتجات المتفردة أو التي تتغير بنحو مستمر أو التي تُنتَج حسب طلب العميل والتي تعود بهوامش ربح كبيرة، فإن الإنتاج بالطباعة الثلاثية الأبعاد — مثل خُلد الماء — يمثِّل قفزة ثورية للأمام.

تجعل تقنيات الطباعة والتصميم الثلاثي الأبعاد عمليتَي التصنيع والتصميم أكثر ذكاءً وكفاءة، وستصبح الشركات الصغيرة قادرة على الحصول على أدوات قوية كانت متاحة في السابق للشركات العالمية فقط. يمكن للشركات ذات الموارد الكبيرة، المزودة بطابعة ثلاثية الأبعاد وبرنامج تصميم، توفير خدمات بارعة وعالية الجودة كانت قاصرة من قبلُ على أقسام التصميم والهندسة الموجودة داخل الشركات.

أثناء قيامنا بالبحث من أجل هذا الكتاب، أدركنا أن الطباعة الثلاثية الأبعاد بدأت تنتشر في مناطق تصنيعية سابقة، في «حزام الصدأ» المتدهور اقتصاديًّا في ريف ولاية

نيويورك، وأجزاء من وسط غرب الولايات المتحدة. في تلك المناطق — في العديد من الحالات — كان العمال يعملون في مصانع محلية توقفت الآن عن العمل، وبعد تسريحهم واختفاء وظائفهم تحت الهجوم المزدوج لتعهيد الإنتاج وأَتْمَتَةِ المصانع، واجهوا اختيارًا صعبًا: فهل يجب أن ينتقلوا لمناطقَ أخرى حيث الوظائف أم يجب عليهم العثور على طريقة للبقاء في أماكنهم والاستمرار في العيش بأي طريقة ممكنة؟

في الماضي، لم تكن أي شركة صغيرة قادرة على شراء طابعة ثلاثية الأبعاد على مستوًى صناعي، ودفع ما يكفي للحصول على قدرة حاسوبية يمكنها تشغيل برامج التصميم الصناعي. هذا آخذ في التغير الآن؛ فإحدى الشركات الصغيرة التي زرناها أسسها رجل امتدت مسيرته الوظيفية لتلحق بأيام ازدهار التصنيع في العالم الغربي. سنطلق عليه هنا اسم «مايك» (وهذا ليس اسمه الحقيقي حيث تُفضِّل عائلته ألا يُحدد اسم شركتهم.) تقدم شركة مايك خدمات هندسة التصميمات والنماذج الأولية والطباعة الثلاثية الأبعاد للشركات الإقليمية.

رتبنا مع مايك لزيارة شركته لمعرفة المزيد عنها، وكانت رحلتنا عبر «حزام الصدأ» محبطة؛ فخلال توجُّهنا لشركة مايك، وبمجرد خروجنا عن الطريق السريع فيما بين الولايات، اختفت إشارة الهاتف المحمول، ورأينا كيف أن الناس انتقلوا بعيدًا تاركين وراءهم مدنًا وقرًى شبه خاوية، تترنح تحت أساس ضريبي آخذ في الانكماش.

خارج نافذة السيارة، كان المنظر الريفي الرائع يحوي تلالًا تظهر واحدًا تلو الآخر، وحظائر حمراء بالية، وأبقارًا هولندية مُنتِجة للَّبنِ تَرْعَى. كان الطريق ذو الاتجاهين يتقاطع من حين لآخر مع قرًى صغيرة تعاني من اختفاء السكان. تبادر إلى الذهن سؤال وهو: «ما الذي يفعله من يعيشون هنا لكسب عيشهم؟»

بعد بضع ساعات من القيادة، أوقفنا السيارة في ممشى بيت مُعتنًى به، وهو المقر الرئيسي لشركة مايك. قابَلَنا مايك عند الباب، وأدخلَنا لورشته واستديو التصميم اللذين يقعان في الدور السفلي. لا يتسم مقر تلك الشركة الصغيرة — الذي نصفه ورشة والنصف الآخر مكتب — بالضوضاء مثل ورش الإنتاج التي كانت في حجم المستودعات في أيام الازدهار القديمة للتصنيع الواسع النطاق المحلي. كانت هناك بضعة أجهزة كمبيوتر موضوعة بعيدًا على مكتب في أحد أركان غرفة جيدة الإضاءة، وكانت هناك طاولة بلياردو بجانب الحائط تعمل — كمعظم طاولات البلياردو — كسطح مفيد لتكديس الصناديق وتخزين البضائع غير المستخدمة.

تخرَّج مايك في المدرسة الثانوية في أوائل سبعينيات القرن الماضي، ودربَتْه أولُ جهةِ عملٍ اشتغل لديها ليكونَ مصممًا للرسومات الصناعية. يصعب اليوم تصديق أن التصنيع كان يومًا ما عملًا مزدهرًا ومجالًا مناسبًا للشباب الواعد الذكي. مع ذلك، فإنه في تلك الأيام كان يمكن لأي شخص كسب ما يكفيه من العيش بالعمل في بيئة التصنيع المحلية.

بعد عدة عقود، سُرِّح مايك ونَقلت الشركةُ التي كان يعمل بها عمليةَ التصنيع خاصتها خارجَ البلاد، ونَقلت طاقم موظفيها المحترفين لمكان آخرَ بعيدٍ في البلاد. منذ ١٥ عامًا تقريبًا، قرر مايك وعائلتُه البقاء في بلدتهم، رغم أسواق الوظائف المحدودة لاقتصاد مِنْطَقتهم المنكمش.

تستطيع شركة مايك القيامَ بالتصنيع الذكي بسبب أن العصر الحالي يتيح للشركات الخدمية الصغيرة مثل شركته شراء المعَدات والبرامج خاصتها. سألْنا مايك إن كان يمكننا رؤية القلب النابض لعملية التصنيع خاصته، ألا وهو الطابعة الثلاثية الأبعاد. صعد بنا مجموعة من السلالم حيث تخطينا بحرص عدة كلاب تمتلكها العائلة اندفعت لتحيط بأقدامنا. في غرفة المعيشة، تخطينا بعض القطط التي كانت تغفو في عدم اكتراث على إحدى أشجار القطط في أحد الأركان. في الجراج، كانت تقبع طابعة ثلاثية الأبعاد من إنتاج شركة استراتاسيس يفوق طولها وعرضها أي ثلاجة فاخرة بقدر ضئيل، كانت منتظرة مَهمتها القادمة في تواضع.

أخبرنا مايك أن الطابعة الثلاثية الأبعاد هي جهاز أساسي يمكِّنه من إضافة قيمة لعمليات تطوير المنتج المقدم للعميل؛ فهو جهاز إنتاج كفء ودقيق يتيح للمصممين والمهندسين اختبار أفكار التصميم على أرض الواقع. وكما يقول مايك: «امتلاك طابعة ثلاثية الأبعاد هو أحد الأسباب التي أستطيع من خلالها إضافة قيمة كمهندس تصميم.»

أوضح مايك أن وظيفته هي أن يتيح للشركات «قدرة ماهرة ودقيقة للغاية على التنبؤ بكيفية ترابط أجزاء المنتج.» ويجعل امتلاكُ طابعة ثلاثية الأبعاد في متناول اليد هذا ممكنًا. فعندما يُكمل مايك تصميم المنتج، يختبره أولًا بطابعته ثلاثية الأبعاد. وبمجرد طباعة المنتج، يُدخل مايك أي تحسينات مطلوبة، إذا احتاج الأمر إلى ذلك. في النهاية، عندما يصبح التصميم مطابقًا لمعايير التصميم خاصته، يعطي ملف التصميم المكتمل لعميله.

في نهاية زيارتنا، سألْنا مايك إن كان عمله كمهندس تصميم اختلف بسبب قدرة أجهزة الكمبيوتر الحديثة والطباعة الثلاثية الأبعاد. رد من دون تردد: «بالطبع؛ فعملية التصميم لأي منتج استهلاكي التي كانت تستغرق عامًا أصبحت الآن تستغرق ثلاثة أشهر

فقط، والطباعة الثلاثية الأبعاد عامل هام جدًّا في حدوث هذا. حاليًّا، نصنع كذلك عددًا أكبر من المنتجات النهائية لعملائنا.»

## (١-١) توفير الوقت من التصميم وحتى امتلاك المنتج (أسرع)

مع تسارع وتيرة العالم من حولنا، أصبحت الشركات أكثر حرصًا على تقليل وقت عملية صناعة المنتج، بداية من التصميم وحتى يحصل عليه العميل. يُعتبَر وقت الإنتاج مقياسًا رئيسيًّا للكفاءة بالنسبة إلى الشركات؛ مما يعني أنه كلما قلَّ الوقت بين التصميم وتوفير المنتج النهائي، كان هذا أفضل. وتقلل الطباعة الثلاثية الأبعاد من الوقت الذي يصل فيه المنتَج إلى المستهلك بتمكين المصممين والمهندسين من صنع نماذج أولية فورية للمنتجات بسرعة وبتكلفة زهيدة.

النموذج الأوليُّ هو مسوَّدة أولى لتصميم المنتَج. تسرِّع النماذج الأولية عملية التصنيع بمساعدة المصممين والمهندسين وفرق التسويق والمصنِّعين على إعادة فحصه للتأكد من كيف سيبدو شكل وأثر وعمل التصميم كما هو مخطط بمجرد أن يصبح منتَجًا ملموسًا، وأشهر ما تقدمه شركات الطباعة الثلاثية الأبعاد هي صنع نماذج أولية لُمصنعي السيارات.

يوفر مصنعو السيارات الوقت عن طريق طباعة أفكار تصميمية على نحو ثلاثي الأبعاد، وعرضها على فريق عملها، وحتى على العملاء في بعض الأحيان. أوضح مايك لنا كيف تسير عملية صنع النماذج الأولية خاصته قائلًا: «دائمًا ما نزود قسم التسويق في شركات تصنيع السيارات بصور من نماذجنا الأولية وعينات ملموسة من أجزاء السيارات.» ثم أضاف: «إننا نرسل إليهم عدة عينات مطبوعة بنحو ثلاثي الأبعاد للأشياء التي يصعب تقديرها من النموذج المصمَّم بمساعدة الكمبيوتر.»

في اليوم الذي زرنا فيه شركة مايك، كان يعمل على تطوير تفاصيل مشروع نموذج أولي لشاحنة جديدة، وبخلاف الماضي عندما كان صنع النماذج الأولية يتم عن طريق فريق تصميم متفرغ داخل الشركات، فإن شركة تصنيع السيارات هذه قامت بتعهيد تصميم المنتج خاصتها. كان قسم التسويق وموظفو المبيعات الإقليمية هما من بقي فقط من طاقم موظفي الشركة. كان أحد المصانع يُنتج بعض أجزاء السيارات التي كان صنعها محليًّا ما زال أقل تكلفة من صنعها في مناطق بعيدة.

تحل النماذج الأولية الخاصة بالطباعة الثلاثية الأبعاد ببطء، لكن على نحو واثق، محل النماذج المصنوعة باليد من الفوم أو الصلصال. كان عميل مايك يستخدم الطريقتين

عن طريق الاستعانة بحرفيين لصنع نماذج يدوية من الفوم لأجزاء السيارات، وكذلك بخدمات شركات مثل شركة مايك لطباعة النماذج الأولية لأجزاء السيارات بنحو ثلاثي الأبعاد. أخبرَنا مايك أن عميله طلب منه مسح أول دفعة من النماذج الأولية المصنوعة من الفوم ثم تحويل البيانات المقروءة لملف تصميم مُفصَّل. وأضاف: «اليوم سنحمل الماسح الضوئي ونذهب به لمكان تصميم الشاحنة.»

على الرغم من ذلك، وقبل صنع أي نموذج أولي، سواء يدويًّا أو بالطباعة الثلاثية الأبعاد، فإن تصميم أي شاحنة يبدأ في قسمي التصميم والتسويق. وبعد العديد من الاجتماعات التي تحدث فيها عملية عصف ذهني، وتتضح فيها مواصفات الشاحنة الجديدة وأهدافها، يقدِّم المهندسون وموظفو التسويق المعلومات للرسامين الذين يصنعون عدة رسومات تخطيطية مفصلة وشبه واقعية لفكرة التصميم. يقول مايك في هذا الشأن: «يُصنع العديد من القرارات على الورق قبل حدوث أي شيء في الواقع.»

بمجرد الموافقة على الرسومات التخطيطية لأي شاحنة جديدة، تبدأ عملية صناعة النموذج الأولي. تعطي النماذج الأولية لفريقَيِ التصميم والتسويق فكرة عن مدى ملاءمة تصميم الشاحنة مع المستخدم والعلاقات المكانية لأجزائها. في كابينة الشاحنة، تُمَكِّن النماذجُ الأولية لمكونات لوحة القيادة والمصابيح الأمامية والأجزاء الأخرى مديرَ المنتج من معرفة كيف ستبدو الشاحنة للمستهلك المستقبلي. وتساعد النماذجُ الأوليةُ لمحرك الشاحنة المصممين الميكانيكيين على التأكد من أن المحرك قابل للإصلاح.

فيما مضى، عندما كانت عملية صناعة النماذج الأولية بطيئةً ومكلفة، وكان من المخاطرة أن تقومَ الشركة بمحاولة لتوفير الوقت والمال والوثوق بأن أي تصميم سيعمل على أرض الواقع. قال مايك في هذا الشأن: «في الماضي كان ينتهي بنا الحال بتصميم رائع حقًّا، لكن بمجرد أن يُنفَّذ، تظهر لنا مشكلات أخرى»، وأضاف قائلًا: «على سبيل المثال، إذا كنت تمتلك سيارة، فيجب أن تُصْلِحَ بعض أجزائها وتغير زيت المحرك. لا يوجد ما يماثل محاولة إدخال أصبعك في المحرك لمعرفة مستوى الزيت لتجدَ أن أصبعك لا يلائم الفجوة.»

يومًا ما، ربما تصبح النماذج المصنوعة يدويًّا من الفوم أثرًا من الماضي؛ فالعديد من الشركات تتجنب الآن الاعتماد على النموذج الأولي المصنوع من الصلصال أو الفوم، وتلجأ مباشرة للنموذج الأولي المطبوع على نحو ثلاثي الأبعاد. وإذا استخدمَتْ شركةٌ



نموذج أولي منشأ بالطباعة الثلاثية الأبعاد بالحجم الطبيعي لكابينة شاحنة كاملة بأجزاء عاملة (الصورة مهداة من شركة أوبجيت).

كلًّا من النماذج الأولية المصنوعة يدويًّا والمطبوعة بتقنية ثلاثية الأبعاد، فإن النموذج اليدوي سيأتي دوره أولًا. ثم سيأتي دور موفر خدمة ماهر مثل مايك، الذي سيلتقط كل الأبعاد المادية الدقيقة لهذا النموذج اليدوي، باستخدام ماسح ضوئي أو ماسح لقياس الأبعاد.

تُعَد صناعة النماذج الأولية يدويًّا نوعًا من الفن. قال مايك: «بعض النماذج القديمة المصنوعة من الفوم رائعة التصميم للغاية.» لكن في المقابل، فإن إنشاء النماذج الأولية المطبوعة على نحو ثلاثي الأبعاد يمكن أن يكون نوعًا من الفن كذلك؛ فالنماذج الأولية الملونة المطبوعة بتقنيات ثلاثية الأبعاد، الخاصة بالسيارات أو الدراجات البخارية، تبدو واقعيةً بطريقة محيرة. ويمكن لأي طابعة ثلاثية الأبعاد أن تصنع أشكالًا معقدة وغير معتادة تمكِّن المصممين من الإتيان بتصميمات مستقبلية ومبتكرة تمامًا، وبنحو أسرع.

## (١-٢) تقليل تكاليف تطوير المنتج (أقل تكلفة)

تستخدم الشركات بعض النماذج الأولية المطبوعة على نحو ثلاثي الأبعاد لعرض أفكار التصميم. وبعض النماذج الأولية الأخرى تُستخدم لاختبار مراحل أخرى في دورة حياة المنتج؛ معرفة كيف ستُنْتَج أجزاء المنتَج بأعداد كبيرة. ويقلل إخضاع الأجزاء المطبوعة على نحو ثلاثي الأبعاد لـ «اختبار الملاءمة» الأخطاءَ التي تصاحب تصميم منتَج معقد للغاية. وبالرغم من اعتيادنا بسهولة على كل ما هو رقمي، فلا يوجد بديل لاختبار الأجزاء المادية بيدك.

أي نموذج أولي يخضع لاختبار الملاءمة ربما يكون مجموعة عبارة عن عدد من الأجزاء غير المجمَّعة التي يحاول المهندسون تجميعها معًا فيما يشبه بروفة تصنيعية؛ فعندما فاجأت شركة مايكروسوفت العالمَ بالإعلان عن فكرة منتج كانت سرية للغاية لجهاز يجمع بين الكمبيوتر المحمول والكمبيوتر اللوحي ويسمى سيرفس، تساءلت وسائل الإعلام كيف استطاعت الشركةُ إبقاءَ تطوير المنتج طي الكتمان. عادةً ما يصحب أيَّ إعلان مبكر عن منتج تقني ثوري صورٌ غير رسمية مسرَّبة من منشأة التصنيع. استطاع قسم مكونات الكمبيوتر في مايكروسوفت إبقاء تطوير المنتج سرًّا بطباعة النماذج الأولية بنحو ثلاثي الأبعاد على أجهزة مخبأة في أحد مباني الشركة.

هناك هدف آخر لاختبار ملاءمة التجميع، وهو التأكد من أن آلات المصنع يمكنها إنتاج فكرة التصميم على أرض الواقع. في دورات تدريس التصميم الهندسي للمنتجات، يقضي الطلَّاب ساعات عدة في التعرف على المقايضات الصعبة بين فكرة المصمم العظيمة وواقع التصنيع. وتصف المراجع الضخمة بتفصيل كبير أيَّ أفكار التصميم ستُجدي وأيها لن يُجدي في خط الإنتاج. وتواجه آلات التصنيع التقليدية الخاصة بقولبة أو صنع الأجسام في أشكال صعوبةً في صنع أجسام مجوفة من الداخل أو مليئة بالأجزاء المتداخلة أو ذات تركيب داخلي معقد. لكن لا يمكن تجنُّب كل تحديات الإنتاج بمجرد اتباع إرشادات المَراجع.

يتبدد الاستثمار الأولي عندما تكتشف أي شركة في وقت متأخر أن أجزاء المنتج الجديد لا تلائم بعضها. إن النماذج الأولية التي تخضع لاختبار الملاءمة تساعد مصممي الهواتف المحمولة في وضع تصميم المكونات بالغة الصغر بحيث تلائم بعضها بنحو مناسب داخل الإطار المصقول للأجهزة. كما أن أجهزة مساعدة ضعاف السمع، ولوحات قيادة السيارات، والشفرات وأمشاط الشعر، والهواتف الذكية، يجب أن تمتلك ملمسًا

ناعمًا وتلائم الجسم البشري جيدًا. إن المحاكاة بالكمبيوتر وبرامج التصميم مستمرة في التطور، لكن حتى أفضل التصميمات لا تخرج دائمًا كما هو مخطط لها بمجرد أن تكونَ في هيئتها المادية.

## (١-٣) صنع أفضل الأجزاء المخصصة (أفضل)

أحد أكثر تطبيقات الطباعة الثلاثية الأبعاد نموًا هو طباعة الأجزاء المخصصة المتاحة للاستخدام النهائي. هذه الأجزاء ليست نماذجَ أولية بل هي الأجزاء الجاهزة للاستخدام. إذا طُفت بمجتمع المنتديات الإلكترونية، فستجد أن من يمتلكون طابعات ثلاثية الأبعاد في المنزل يتبادلون النصائح وملفات التصميم من أجل الأجزاء البديلة الخاصة بالأجهزة المنزلية الشائعة، بدءًا من مقابض الأبواب وحتى حلقات ستائر الحمام. بعض الناس يطبعون بنحو ثلاثي الأبعاد المقابضَ أو التروس أو أي أثر قديم أو أجزاء أُوقف تصنيعها ومن المكلف للغاية صنعها يدويًّا.

وبما أن الأجزاء المخصصة لا تستفيد من اقتصادات الحجم فيما يتعلق بالسعر، فإن موفري خدمات الطباعة الثلاثية الأبعاد المَهَرة الصغار تُتاح لهم فرصُ عمل جديدة. تستخدم شركات تصنيع السيارات والدراجات البخارية — وحتى الشركة المصنِّعة لمركبة مارس روفر — أجزاءً مخصصة مطبوعة بنحو ثلاثي الأبعاد لبناء نُسخ عاملة من فكرة مَرْكبة أو آلة. وفي نهاية الأمر، فإنه من الضروري خضوع المركبات التي هي بملايين الدولارات لاختبارات قيادة على أرض الواقع.

تُعتبر الصناعات الطبية وتلك الخاصة بطب الأسنان مستهلِكَيْنِ قويين للأجزاء النهائية المطبوعة بنحو ثلاثي الأبعاد؛ بسبب أن منتجاتهما يجب أن تلائم الجسد بدقة وإحكام. وقد زادت الطباعة الثلاثية الأبعاد لتيجان وأدوات تقويم الأسنان المخصصة، وتُطبع أجهزة مساعدة ضعاف السمع والأطراف الصناعية من عمليات المسح البيانية لقناة أذن المريض أو ما تبقَّى من العضو المبتور.

تستخدم شركات صناعة الطائرات أجزاءً مخصصة مطبوعة بنحو ثلاثي الأبعاد في الطائرات ذات الأغراض التِّجارية. عندما تستقل طائرة جديدة، انظر إلى أنبوب الهواء القابل للتعديل الذي يعلو مقعدك. هذا الأنبوب مثال جيد لجزء مكلف ومخصص جدًّا لا يستفيد من اقتصادات الحجم. وبسبب أنها تختلف عن فرش الأسنان بنحو خاص، يُصنع عدد قليل فقط من الطائرات الجديدة كل عام.

عندما زرنا موفِّر خدمة آخر من أصحاب الشركات الصغيرة في «حزام الصدأ» في وسط غرب الولايات المتحدة، عرض علينا جسمًا بلاستيكيًّا نصف شفاف طُبع بنحو ثلاثي الأبعاد يحاول تحسينه. كان الجسم يبدو مألوفا بنحو غريب لكن من الصعب تحديد هُوِيَّته بدقة، كان بحجم هراسة الثُّوم ومصنوعًا من عدة تروس وتجاويفَ دائرية متداخلة.

لم نقدر على تحديد كُنْه الجسم غريب الشكل إلا عندما أخبرَنا المصمم؛ قال: «هذا أنبوب هواء مطبوع بنحو ثلاثي الأبعاد لطائرة بوينج ٧٤٧.» يسعى دائمًا القائمون على صناعات الطائرات لتقليل تجميع الأجزاء. ويمكن أن تُصنع أجزاء أنبوب الهواء المطبوع بنحو ثلاثي الأبعاد في قطعة واحدة مجمعة بالفعل.

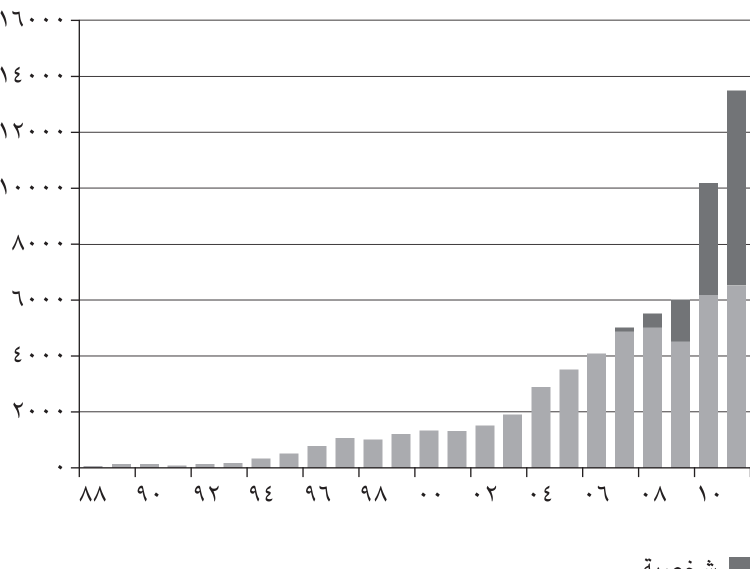
## (١-٤) تحديد حجم السوق

من المستحيل أن نعرف على وجه الدقة كيف انجذب العديد من الأعمال الصغيرة لسوق خدمات التصنيع الذكي. مع ذلك، فهناك بعض البيانات الموثوقة عن هذه السوق. كلَّ عام، ينشئ المستشار والمحلل بمجال التصنيع بالإضافة، تيري وولرز، تقريرًا سنويًّا يُسمى «تقرير وولرز». هذا التقرير يضم بيانات عن السوق والاستخدام، بالإضافة إلى دراسات حالات مجمَّعة من حوالي مائة شركة من أكبر الشركات التي تبيع الطابعات الثلاثية الأبعاد حول العالم، أو تُوفِّر أو تشتري خدمات هذا النوع من الطباعة. هذا التقرير يُعتبر مصدرًا ثمينًا فيما يخص المعرفة بمجال التصنيع بالإضافة، وقد أصبح تقييمًا غير رسمي لحالة السوق بالنسبة إلى المحللين والرؤساء التنفيذيين والصحفيين على حد سواء.

عندما أجرى تيري وولرز مقابلات مع الشركات الرائدة في الطباعة الثلاثية الأبعاد على مستوى العالم، كان أحد الأسئلة التي طرحها تتعلق بمن يشتري هذه الطابعات أو يحصل على خدماتهم في الطباعة. أظهر بحثه أن شركات الأجهزة الإلكترونية الاستهلاكية تستخدم خدمات ومنتجات الطباعة الثلاثية الأبعاد بنحو كبير، تليها شركات تصنيع السيارات والصناعات الطبية والخاصة بطب الأسنان وصناعات الطائرات.

تشير بيانات وولرز عن السوق إلى أن الولايات المتحدة تضم حوالي ٤٠ بالمائة من طابعات العالم الثلاثية الأبعاد. هناك أيضًا شركات في ألمانيا واليابان تستكشف وتستخدم الطباعة الثلاثية الأبعاد بنحو فعال حيث تضم كلٌّ منهما نسبة تبلغ ١٠ بالمائة من طابعات العالم الثلاثية الأبعاد. ومن الصعب العثور على بيانات موثوق بها عن الطباعة الثلاثية الأبعاد في الصين. وطبقًا لبيانات وولرز، بالرغم من سيطرة الصين على سوق

التصنيع الواسعة النطاق، فإنها تضم ما يصل إلى ٨٫٥ بالمائة فقط من الطابعات الثلاثية الأبعاد في العالم.




شكل بياني يوضح عدد الطابعات الثلاثية الأبعاد التي تباع كل عام. مبيعات الآلات الخاصة بالأفراد (التي يقل سعرها عن ٥ آلاف دولار) بدأت في عام ٢٠٠٧ وتفوقت على مبيعات الآلات الخاصة بالشركات في عام ٢٠١١ (البيانات مهداة من شركتي وورلز أسوسيتس وتوان تران فام).

في المعتاد تمتلك أكثر الشركات استهلاكًا للطابعات الثلاثية الأبعاد وخدماتها الكثير من المال. مع ذلك، فإن حجم سوق خدمات الطباعة الثلاثية الأبعاد والسلع المطبوعة بها ما زال بالغ الصغر، وخاصة عندما يُقارَن بسوق خدمات وسلع التصنيع التقليدي الذي يصل حجمه إلى ١٥ تريليون دولار سنويًّا. ويقدِّر تيري وولرز أنه في عام ٢٠١١، حدث تداول ما يصل إلى ١٫٧ مليار دولار أمريكي في سوق الطباعة الثلاثية الأبعاد. وإذا كانت السوق العالمية للتصنيع التقليدي في حجم الكرة الشاطئية، فإن حجم السوق العالمية للطباعة الثلاثية الأبعاد سيكون في حجم كرة تنس الطاولة.

على الجانب الآخر، فإنه على الرغم من أن صناعة بحجم ١٫٧ مليار دولار تُمثِّل مكونًا متواضعًا في الاقتصاد العالمي، فإن هذه السوق ليست صغيرةً كما يبدو للوهلة الأولى؛ فمشروعات التصنيع الصغيرة مثل شركة مايك تُشكِّل مشهد التصنيع العالمي. في الواقع، تشير بيانات مكتب الإحصاء الأمريكي إلى أن نحو نصف شركات التصنيع في الولايات المتحدة توظف أقل من عشرة موظفين، كما يوظف ربعها أقل من خمسة موظفين. ربما تكون صناعة الطباعة الثلاثية الأبعاد التي يُقدَّر حجمها ببضعة مليارات الدولارات سنويًّا شيئًا ضئيلًا عند النظر إلى الصورة الأشمل، لكن توزيع بضعة مليارات من الدولارات على العديد من المشروعات الصغيرة يمكن أن يُمثِّل فارقًا كبيرًا.

## (٢) لوح الرسم الفارغ للقرن الحادي والعشرين

تحرص الشركات الصانعة للطابعات الثلاثية الأبعاد على مراقبة العالم الجديد للتصنيع الذكي. زرتُ إحدى الشركات الرائدة في صناعة هذه الطابعات لمعرفة المزيد عن هذا العالم. من الخارج، بدا مقر شركة ثري دي سيستمز كمقر أي شركة تقنية ناجحة متوسطة الحجم تضم أكثر من ٧٠٠ موظف. لم يكن المظهر الخارجي للمبنى الأبيض الزجاجي يشير إلى حجم الطاقة الإبداعية بداخله.

يجلس زوار الشركة في قاعة انتظار جديرة بمعرض في أحد متاحف الفن الحديث؛ فالحوائط البيضاء النظيفة تعرض أجسامًا ملونة بألوان زاهية ومطبوعة بنحو ثلاثي الأبعاد. في الجانب الأيمن من الغرفة، هناك سيارة سباق حمراء لامعة في حجم السيارات الاصطدامية في الملاهي تقبع في فخر على إحدى القواعد. وعلى اليسار، هناك منضدة محمَّلة بعشرات الألعاب الملونة وأجزاء عشوائية من الآلات والمطبوعة كلها بنحو ثلاثي الأبعاد.

بالقرب من هذا، يُعرض جيتاران كهربائيان بلاستيكيان غير تقليديين يعملان بكل كفاءة ومطبوعان بنحو ثلاثي الأبعاد. أحدهما قرمزي والآخر أحمر زاهٍ، وهما من تصميم أولاف ديجل من نيوزيلندا. كان جسما الجيتارين نتاجَ تصميم منتج مطبوع بنحو ثلاثي الأبعاد. وللتقليل من وزنهما وزيادة جودة الصوت (وإعطائهما المنظر غير التقليدي الذي هما عليه)، زُود هيكلهما الشبكي الشكل بقطوع متعرجة وتجاويف غريبة المنظر.

تُعتبر شركة ثري دي سيستمز، والتي يقع مقرها في الولايات المتحدة، من أكبر وأقدم الشركات التي تبيع الطابعات الثلاثية الأبعاد، وتُعتبر رائدة عالم الطباعة الثلاثية الأبعاد. تبيع الشركة طابعات ثلاثية الأبعاد عالية الجودة منذ ثمانينيات القرن الماضي. وتقوم



صُنع هذا الجيتار الكهربائي بطابعة إس برو ١٤٠ بنظام التصليد الانتقائي بالليزر من قِبل شركة ثري دي سيستمز (الصورة مهداة من أولاف ديجل، نيوزيلندا).

استراتيجية الشركة على هدفين: الأول، هو استمرار صنع وبيع طابعات ثلاثية الأبعاد قوية وحديثة للشركات العاملة في مجال الطباعة؛ وثانيهما، الوفاء بالوعد الذي يُمثِّله شعار الشركة، وهو توفير «حلول طباعة ثلاثية الأبعاد للمحتوى» ببناء منصة عالمية بين المُصنِّع والمستهلك لمساعدة الناس في تنفيذ أفكار التصميم على أرض الواقع. تستثمر الشركة بنحو كبير في فكرة أن الناس سيندفعون لشراء أول منتَج يسهِّل من تحويل المحتوى الرقمي إلى منتج على أرض الواقع.

يُشبِّه إيب رايكنتال، المدير التنفيذي لثري دي سيستمز، الطباعة الثلاثية الأبعاد بـ «لوح الرسم الفارغ للقرن الحادي والعشرين». ينظر إيب للطباعة الثلاثية الأبعاد باعتبارها موازِن صوت كبير. قال إيب للصحفيين خلال إطلاق الشركة لمنتج استهلاكي

جديد — وهو طابعة ثلاثية الأبعاد أنيقة ولامعة المظهر ومنخفضة السعر تُسمى كيوب: «أجزم بأن أي شخص يمكن أن يُبدع إذا تخلَّص من كل القيود والخوف.»[1] هذه الطابعة تشبه آلة صنع القهوة المنزلية المتطورة، وهي أول تجرِبة للشركة في السوق المنزلية. يتعارض مظهر الطابعة الجميل مع الطابعات المنزلية الأخرى التي تتميز بالبساطة مثل طابعة ريبليكيتور الشهيرة الخاصة بشركة ميكربوت.

الابتكار تقليد قديم للشركة. اخترع مؤسس الشركة، تشاك هال، في منتصف الثمانينيات طريقة للطباعة تسمى الستيريوليثوجرافي، أو الطباعة الفراغية، وهي تقنية تستخدمها اليوم العديد من الطابعات الثلاثية الأبعاد الصناعية حول العالم. لاحظت أثناء زيارتي وجود طابعة ثلاثية الأبعاد قديمة من طراز إس إل إيه ١ خلفَ مِنطقة الاستقبال كرمز لسجل الشركة الطويل في المجال الصناعي. تشبه تلك الطابعة في مظهرها الكمبيوترَ المركزي القديم الذي يعود لفترة الستينيات، ويبلغ حجمها تقريبًا حجم ماكينة البيع الآلية، وهي تُعَد أول طابعة تِجارية ثلاثية الأبعاد في العالم. وهي تقبع هناك في سلام موصلة بكمبيوتر قديم من نوع آي بي إم يرجع لعام ١٩٨٧.

وراءَ مكتب الاستقبال، استمر الجو العام الشبيه بعالم شخصية ويلي وونكا؛ إذ زخرت غرفٌ عدة زجاجية الجدران بموظفين كانوا ينفِّذون مهامَّ العمل بالشركة. كانت غرفة اجتماعات مجلس الإدارة ظاهرة من وراء حائط زجاجي حيث اكتست بمظهر يتسم بالبهاء والوقار بنحو ملائم، اكتمل بوجود طاولة ضخمة فخمة المظهر ومصنوعة من خشب الماهوجني. في غرفة أخرى زجاجية الجدران، تحركت فِرق من التقنيين ذوي المعاطف البيضاء هنا وهناك؛ مثل مجموعة من الممرضين الذين يعتنون بمرضاهم. داخل الغرفة، كان هناك ٢٤ طابعة ثلاثية الأبعاد من كل الأحجام والأشكال والتي كانت تُمثِّل خط الإنتاج الكامل للشركة. كان التقنيون يعملون على ضبط أداء كل طابعة واختبار خواص المواد الخام الجديدة.

أوضح راجيف كولكارني، نائب رئيس الشركة للمنتجات الاستهلاكية، أنه لاجتذاب المستهلكين إلى هذا المجال، تحتاج صناعة الطباعة الثلاثية الأبعاد إلى مِنَصة تمتد لتغطي مدار دورة الإنتاج الكاملة، من المسح الثلاثي الأبعاد إلى التصميم والطباعة الثلاثيَّة الأبعاد. قال راجيف: «اعتاد الناس استخدام منتجات جوجل ومايكروسوفت وأمازون. نحن نأخذ أفضل العناصر في استراتيجيات هذه الشركات، وندمجها معًا في مِنَصة تتيح لهم تجرِبة التقنية الثلاثية الأبعاد بنفس الشكل.»

تسترشد استراتيجية مِنَصة شركة ثري دي سيستمز بعالم البرمجيات حيث تقوم تجرِبة المستهلك — وكذلك سيطرة الشركة السوقية — على قدرة الشركة على بناء منصة برمجية والتحكم فيها. على سبيل المثال، صممت مايكروسوفت نظام ويندوز ومجموعة أوفيس ليصبحا أكبر منصة عالمية للإنتاج المكتبي. في عالم الأجهزة المحمولة، فإن منتجات شركة أبل آي بود وآي باد وآي فون تُوفِّر للمستهلك منتجات ذكية وسهلة الاستخدام، وأدت إلى إيجاد طرق جديدة تمامًا لبيع البرمجيات على هيئة تطبيقات.

لكي تبنيَ شركة ثري دي سيستمز مِنصتها الخاصة، انهمكت في فورة شراء تصيب بالدوار؛ حيث استحوذت على ما يقرب من ٢٤ شركة على مدار الأعوام الثلاثة الأخيرة. تُمثِّل الشركات المُستحوَذ عليها العديد من نواحي عملية التصميم والإنتاج المختلفة. ويتيح بعضها خدمات تصميم والبعض الآخر يصنع مواد الطباعة أو يصنع الطابعات أو يصنع المحتوى والأدوات؛ على سبيل المثال، واجهة بسيطة تساعد المستخدمين في تصميم روبوتات بسيطة قابلة للطباعة بنحو ثلاثي الأبعاد.

أضاف راجيف: «رغم أن ثري دي سيستمز تجيد صناعة الطابعات الثلاثية الأبعاد، فنحن نهدف إلى إتاحة عملية المسح والتصميم والإنتاج الثلاثية الأبعاد للجميع. وهذا لا يمكن تحقيقه بمجرد توفير طابعة ثلاثية الأبعاد للناس؛ بل يجب تحقيقه عن طريق تقديم منصة لهم.»

تُعتبر كاثي لويس، نائبة الرئيس للتسويق في شركة ثري دي سيستمز، شخصية ذات خبرة ورؤية عملت على مدى فترة طويلة في مجال الطباعة الثلاثية الأبعاد القليلة التكلفة. وقبل انضمامها للشركة في عام ٢٠١٠، كانت المديرة التنفيذية لشركة ديسكتوب فاكتوري، وهي إحدى أولى الشركات في صناعة طابعات ثلاثية الأبعاد تِجارية موجَّهة للسوقَيْنِ المنزلية والمكتبية. أنتجت شركة ديسكتوب فاكتوري طابعات ثلاثية الأبعاد التي كانت — على عكس معظم الطابعات الثلاثية الأبعاد الصناعية المتوافرة في ذلك الوقت — تطبع النايلون باستخدام ضوء مركَّز من مصباح الهالوجين شائع الاستخدام وليس الليزر.

عندما أسس تشاك هال شركة ثري دي سيستمز في عام ١٩٨٦، لم يكن من المحتمل أنه تنبأ بأنه في غضون بضعة عقود ستتكون سوقة صغيرة — لكنها نامية — للطابعات الثلاثية الأبعاد للاستخدام المنزلي. عندما عَرضت كاثي لويس طابعة كيوب في المعارض التِّجارية الخاصة بالإلكترونيات والأحداث الصناعية لأول مرة، اكتشفت درجة غير متوقعة

من الاهتمام، ليس فقط من المستهلكين ولكن من شركات التصنيع الصغيرة أيضًا. قالت كاثي في هذا الشأن: «في البداية، فوجئنا بعدد الناس الذين بدءوا في طرح أسئلة حول ما إذا كان يمكنهم استخدام الطابعة من أجل تصنيع المنتج النهائي»، وأضافت: «أعتقد أن هناك حاجة في السوق لمساعدة الشركات في تكوين رؤية عن كيفية كسر نماذجهم الحالية لجني فوائد هذا النوع الجديد من التصنيع.»

واليوم، فإن شركة ثري دي سيستمز تتابع عن كثب العديد من الاتجاهات الرئيسية التي ستُشكِّل مستقبل عالم الطباعة الثلاثية الأبعاد. وتؤمن الشركة بأن الحوسبة السحابية وتحليل البيانات الضخمة والوجود المتزايد للأجهزة المحمول الذكية والقوية سيتيح فرصًا جديدة وللابتكار والعمل للجميع. كل هذا يعتمد على العثور على تطبيقات مفيدة للطباعة الثلاثية الأبعاد تجعل حياة الناس أسهل وأفضل.

قالت كاثي: «لحل مشكلات العميل، يجب أن تبحث عن احتياجاته فيما يتعلق بالتطبيقات»، مضيفة: «الأمر لا يتعلق بـ «صناعة آلة تعمل بنحو أفضل وأسرع» بل بـ «صناعة آلة تحل بحق المشكلة الموجودة اليوم».»

## (٢-١) البحث عن التطبيق القاتل

تمر تقنيات الطباعة الثلاثية الأبعاد الموجَّهة إلى المستهلك اليوم بمرحلة تسمى «مرحلة ألتير». في السبعينيات من القرن الماضي، كان أول أجهزة الكمبيوتر الشخصية مثل كمبيوتر ألتير عبارة عن مجموعات أدوات خرقاء يجب على مستخدميها امتلاك مهارات تقنية لتجميعها بأنفسهم في المنزل. ومع وجود استثناءات قليلة، فإن معظم أوائل الطابعات الرخيصة التي بِيعت كان يُجمع بصبر، ويحتاج إلى الكثير من الضبط، وأحيانًا اكتشاف المشكلات وحلها.

عندما تحدثتُ مع راجيف، وصف إحدى أكبر العقبات أمام عامة الجمهور للاعتماد على الطباعة الثلاثية الأبعاد، وهي غياب ما يُطلق عليه «التطبيق القاتل» أو التطبيق السهل والمهم الذي يذيع صِيت التقنية المصمم من أجلها. قال لي: «انظر إلى جهاز الآي باد، كانت سوق الأجهزة اللوحية تعاني قبل ظهوره. لم يكن الآي باد أكثر المنتجات التقنية تقدمًا، لكنه أحدث ثورة في المجال بسبب أنه كان بسيطًا وفي المتناول وسهل الاستخدام. وإذا ركزنا على التطبيقات بدلًا من التكنولوجيا، فلدينا فرصة أكبر في جعل الناس يعتمدون على هذه التقنية.»

التطبيق القاتل — مثل البريد الإلكتروني أو فيسبوك أو لعبة الطيور الغاضبة — هو منتج أو أداة لصنع أسواق جديدة ونماذج عمل جديدة واجتذاب العملاء لاستخدام تقنية جديدة. هذه التطبيقات القاتلة بوجه خاص اجتذبت الملايين من العملاء الجدد للكمبيوتر الشخصي والإنترنت والآي باد. ولصنع التطبيق القاتل الخاص بالطباعة الثلاثية الأبعاد، تحتاج هذه التنقية إلى منصة سهلة الاستخدام من الأدوات وتطبيق أو لعبة لها جاذبية كبيرة تؤدي إلى خلق أسواق جديدة واجتذاب الملايين من المستخدمين الجدد.

لم يشعر المستهلك العادي أو الشركات الصغيرة بعدُ بالحاجة المِلحَّة لشراء الطابعات الثلاثية الأبعاد لاستخدامها في المنزل أو المكتب؛ ويرجع هذا جزئيًّا إلى عدم وجود هذا التطبيق القاتل. ما زالت سوق الطباعة الثلاثية الأبعاد محصورةً في شركات التصميم والتصنيع. وإذا كانت القيمة الدولارية السوق العالمية لكل الطابعات الثلاثية الأبعاد وخدماتها في حجم كرة تنس الطاولة، فإن القيمة الدولارية للسوق العالمية للطابعات الثلاثية الأبعاد وخدماتها الخاصة بالمستهلك ستكون أصغر لتصل إلى حجم حبة الأرز تقريبًا.

تتفاءل شركة الاستشارات الاستثمارية ذا موتلي فول بشأن الفرص المتاحة للشركات العاملة في مجال الطابعات الثلاثية الأبعاد الموجهة للمستهلكين. لكن على العكس، فإن المحلل تيري وولرز متحفظ؛ إذ يحذر أنه على الرغم من أن المستهلكين يدفعون المال الوفير بحماس للحصول على سلع جميلة مخصصة مصنوعة بالطباعة الثلاثية الأبعاد، «فإن معظم المستهلكين لن يمتلكوا أو يشغِّلوا آلة لإنتاج هذه المنتجات. بدلًا من ذلك، سيلجئون إلى شركات مثل شيبوايز أو أمازون أو أي خدمة أخرى أو متجر؛ لشراء هذه المنتجات. لن يعرف الغالبية، أو حتى يهتموا، بكيفية صنع المنتجات — ولا يختلف هذا عن الطريقة التي يشتري بها الناس منتجاتهم حاليًّا.»[2]

مع ذلك، فهناك دلائل على نمو محتمل. ذكر تقرير شركة ثري دي سيستمز السنوي أنه فيما بين عامي ٢٠١٠ و٢٠١١، زادت عوائد مبيعات الطابعات الثلاثية الأبعاد المتوسطة والصغيرة الحجم للاستخدامات الشخصية والاحترافية — وليست الصناعية — بنسبة ٤٠ بالمائة عن العام الذي سبقه. كما أن الشركات الرائدة في السوق مثل ثري دي سيستمز وميكربوت وبي بي ثري دي بي تستثمر بنحو كبير في صنع مِنصات ومنتجات سهلة الاستخدام لجذب المستخدمين لشراء الطابعات. وخارج عالم التجارة، يعمل مجتمعٌ

متنامٍ من الصناع على شراء وصنع طابعات ثلاثية الأبعاد للاستخدام المنزلي، ومشاركة ملفات التصميم المبتكرة والنصائح المجانية مع العالم من حولهم. ويمكن للأعمال التي تعمل بأسلوب الحرفيين جني الأرباح بتصميم وبيع أجزاء آلات أو مجوهرات أو أعمال فنية مخصصة مطبوعة بنحو ثلاثي الأبعاد.

يومًا ما، ستختفي تدريجيًّا القيود والعقبات التكنولوجية التي لا تشجع على الاستخدام اليومي للطباعة الثلاثية الأبعاد. السر في هذا هو صنع تقنيات طباعة ثلاثية الأبعاد أكثر مرحًا واجتماعية، وبالطبع، أسهل في الاستخدام. مثل هذا الأسلوب يذكِّرنا باستراتيجية شركة أبل المبكرة مع المستهلكين. منذ عقود مضت، قبل أن يصبح امتلاك الكمبيوتر الشخصي أمرًا شائعًا، أوضح ستيف جوبز لماذا كان العامة يحبون كمبيوتر ماكنتوش حيث قال: «معظم الناس ليس لديهم فكرة عن كيفية عمل جهاز نقل الحركة الأوتوماتيكي لكنهم يعرفون كيف يقودون السيارة. لا يجب عليك دراسة الفيزياء لفهم قوانين الحركة لتقود السيارة.» عندما يبتكر عالم الطباعة الثلاثية الأبعاد تطبيقه القاتل، ويصنع مِنصة سهلة الاستخدام جذابة، فستنمو السوق على نحو كبير.

## (٢-٢) الربط بين الإنتاج الحرفي والإنتاج الواسع النطاق

يُشاع عن كاتب الخيال العلمي بول أندرسون قوله: «لم أواجِهْ من قبلُ مشكلةً — مهما كانت معقدة — تظل بنفس التعقيد إذا نظرت لها بالشكل الصحيح.» إن التنبؤ بالأسواق المستقبلية لمنتجات وخدمات الطباعة الثلاثية الأبعاد مهمة عصيبة بنحو مساوٍ؛ فمن الصعب — بل المستحيل — أن تقول بضع كلمات واضحة تلخص نماذج عمل جديدة محتملة، تُوفِّر منتجات أو خدمات قليلة التكلفة أو سريعة أو جيدة لعملائها.

لِمَا يزيدُ على قَرْن حتى الآن، كان معظم دول العالم الصناعية موطنًا لعالمين تِجاريين مختلفين يسيران جنبًا إلى جنب بتوازٍ ولا يلتقيان أبدًا؛ الإنتاج الحرفي والإنتاج الواسع النطاق. يجب أن تنظرَ الشركات الباحثة عن فرص جديدة في السوق لما وراءَ المنتجات والخدمات التي تنتمي لأي من العالَمَين المتوازيين. تكمن الفرص في الخدمات أو المنتجات التي كان في الماضي من غير العملي أو المستحيل تقديمها بقدر من الربح بسبب قيود الإنتاج الواسع النطاق والإنتاج الحرفي. بمعنًى آخر، فإن الفرص تكمن في نماذج الأعمال التي لا تعتمد فيها الأرباح على اقتصادات الحجم.

على سبيل المثال، تخيَّل إذا قرر ميكانيكي السيارات خاصتك — وهو متشكك بنحو كبير في إمكانية وجود إصلاح السيارات بنحو جيد وسريع وقليل التكلفة في آنٍ واحد — العمل في نشاط جديد؛ وهو بيع إطارات السيارات المطبوعة بنحو ثلاثي الأبعاد. ستكون هذه استراتيجية عمل جريئة بالنسبة إليه؛ لأن إطارات السيارات سلع استهلاكية تقليدية تُصنَع بالإنتاج الواسع النطاق؛ وفي أحد أركان المكان الملطخ بالشحم حيث يُصلح السيارات، يضع الطابعة الثلاثية الأبعاد التي ستصنع أشكالًا دقيقة من الإطارات المطاطية المتينة ذات الجودة العالية.



هل يمكن أن يكون هذا مصنع المستقبل؛ غرفة هادئة صغيرة مليئة بالطابعات الثلاثية الأبعاد؟ (الصورة مهداة من شركة دايناسيبت).

دعونا نفترض من البداية أن أول نموذج عمل له سيكون صنع وبيع الإطارات الثلاثية الأبعاد المطابقة للإطارات التي تقبع في مخزنه. لأي شخص ذي معرفة بمجال الطباعة الثلاثية الأبعاد، لن يبدوَ هذا قرارًا حكيمًا، لكن دعونا نفترض أن ميكانيكي السيارات العنيد مضى قُدمًا في تنفيذ خُطته على أي حال.

ستكون النتائج مخيبةً للآمال، إذا نسخ تصميمات الإطارات الخاصة بالشركات الكبرى للإطارات، فإن إطاراته ستظل تبدو مملة ولا حياة فيها، وكذلك أكثر تكلفة. في النهاية، سيدرك عن طريق التجرِبة الفاشلة أن اقتصادات الحجم لا ترحم. ستكلف الإطارات المطبوعة بنحو ثلاثي الأبعاد الكثير لشرائها (فهي ليست رخيصة). وستستغرق

كذلك الإطارات المخصصة وقتًا أطول لصنعها بنحو فوري بدلًا من إخراج أربعة إطارات جديدة من مخزنه من الإطارات المنتَجة بأعداد كبيرة لأسماء تِجارية كبرى (أي إنها ليست سريعة). صحيح أن الإطارات المطبوعة بنحو ثلاثي الأبعاد ستكون بتصميم وجودة مثاليين لكن لا يمكن جعل أي مشروع يستمر بالجودة وحدَها.

وأخيرًا، وبعد أن يقترب الميكانيكي من الإفلاس، يجلس ليعيد التفكير في الأمور. لن يعتمد نموذج العمل المعدل خاصته على كفاءة الإنتاج الواسع النطاق. بدلًا من ذلك، سيتيح مشروعه الجديد للإطارات المطبوعة بتقنية ثلاثية الأبعاد إطارات مصممة حسب الطلب لعملاء مستعدين لدفع المزيد من المال.

ومقارنة بطلب عدد من الإطارات المخصصة التي يصنعها اختصاصي إطارات خاصة بسباقات فورمولا وان، فإن إطاراته المطبوعة بنحو ثلاثي الأبعاد ستكون أقل تكلفة، وستستغرق وقتًا أقل نسبيًّا في إنتاجها. وكذلك، عند مقارنة إطاراته بالإطارات التي تُنتجها علامات تِجارية شهيرة لتناسب جميع المقاسات التي يبيعها في ورشته أو مخزنه، فإن الإطارات المطبوعة بنحو ثلاثي الأبعاد يمكن أن تمتلكَ مِيزات أفضل.

إن هذه الإطارات المطبوعة المخصصة — بخلاف نظرائها التقليدية — يمكن أن يتم صُنعها بأعداد صغيرة. وهذه الإطارات كذلك يمكن أن تحمل بكل فخر اسم صانعها لتترك أثرًا خاصًّا به في الرمال أو الثلج. ومثل سوق لوحات أرقام السيارات المخصصة، يمكن أن يدفع بعض العملاء المزيد من المال من أجل إطارات مخصصة. تخيَّل احتمالات التسويق والتمييز السلعي؛ فيمكن لجامعة موسرة أن تبيعَ إطاراتٍ تحمل صورة البرج الجرسي الشهير المميز لها لخريجي كلياتها المخلِصين.

وبما أن السوق المحلية في أي بلدة صغيرة ليست كبيرة بما يكفي لتوفير عدد كافٍ من العملاء بحيث تُبقي على استمرار هذا العمل، فإن الميكانيكي سيبيع هذه الإطارات لسوق عالمي من خلال منفذ له على الإنترنت. ويمكن للعملاء حينَها تصفُّح تصميمات الإطارات أو حتى تحميل التصميم خاصتهم للإطار المخصص. ولتوفير تكاليف الشحن، يمكنه عقد صفقات مع ميكانيكيي السيارات في العديد من المواقع الأخرى للحصول على عمولة مقابل طباعة إطاراته محليًّا.

وبغض النظر عن أغراض الزينة، فإن الإطارات المخصصة يمكن أن تستخدمَ قوة الطباعة الثلاثية الأبعاد لتحسين جودة المنتج؛ فيمكن تصميم كل إطار مطبوع بتقنية ثلاثية الأبعاد باستخدام خوارزميات حاسوبية لتوفير أفضل قوة جر مناسبة للطقس

المحلي. كما يمكن لأصحاب طرازات معينة من السيارات (أو السائقين المغامرين) طلب إطارات بمواصفات خاصة لتحسين أداء سياراتهم وتقليل فرص وقوع حوادث. وبعض المصممين في المستقبل سيمكنهم ابتكار تصميمات جديدة ومختلفة جذريًّا للإطارات لتحسين كفاءة دوران الإطار أو مقاومته التآكل.

في الواقع، لتحقيق أرباح، فإن هذا الجيل الجديد من شركات الإطارات سيزيد الأسعار بنحو كبير لهذه الإطارات المطبوعة بنحو ثلاثي الأبعاد حسب مواصفات العميل. لكن إذا توافر ما يكفي من العملاء المستعدين لدفع أعلى الأسعار للحصول على إطارات أصلية بعلامات تِجارية مميزة توفِّر منتجًا ذا أداء عالٍ، فإن بيع الإطارات المطبوعة بنحو ثلاثي الأبعاد يمكن أن يُمثِّل نموذج عمل ممتازًا. وسيتوجب على الميكانيكي خاصتي تعديل اللافتة التي توجد بالقرب من آلة دفع النقود خاصته لتقول: «يمكنك الحصول على الخدمة بنحو جيد أو سريع أو قليل التكلفة؛ اختر اثنين فقط — إلا إذا كنت تريد إطارات مخصصة مطبوعة بنحو ثلاثي الأبعاد.»

الفصل الرابع

# اقتصاد الغد القائم على المنتجات القابلة للطباعة

أحد أكثر الأسئلة شيوعًا حول الطباعة الثلاثية الأبعاد هو: هل هذه التقنية الجديدة ستخلق وظائف أم ستدمرها؟ عادةً ما أتلقى هذا السؤال من صانعي السياسات والسياسيين المحليين والصحفيين. وبعد حديث قمت به مؤخرًا حول مستقبل الطباعة الثلاثية الأبعاد في مدرسة للمرحلة التعليمية المتوسطة، شعرت بالذهول قليلًا عندما رفع تلميذ يده وسألني: «هل ستساعد الطباعة الثلاثية الأبعاد في خلق وظائف؟»

أوضحت للتلميذ بشجاعة أنه ليس هناك إجابة بسيطة على هذا السؤال؛ إذا كان هناك أي دلالات من الماضي، فإن الطباعة الثلاثية الأبعاد — كأي تقنية جديدة أخرى تُحدِث تغييرًا جذريًّا في النظام السائد — ستعيد تشكيل المجال الوظيفي بطرق جديدة وغير متوقعة. سألت زملاء هذا التلميذ في الفصل إن كانوا سمعوا من قبلُ بما يسمى وكيل السفريات، كان القليل منهم قد سمع به، وصفت لهم كيف أن الإنترنت قضى على هذه الوظيفة، لكنه في المقابل، فتح سوقًا جديدة للخدمات المتعلقة بالسفر. بالمثل، فإن الطباعة الثلاثية الأبعاد ستتيح نماذج أعمال جديدة بينما ستقضي على أخرى، وستختفي بعض الوظائف بينما ستظهر وظائف جديدة بالكامل.

لحسن الحظ، بدا على الطالب الرضا بإجابتي، لكن سؤاله دفعني للتساؤل عما سيشهده جيله في حياته. في عصرنا الحالي، أصبحت الطباعة الثلاثية الأبعاد بالفعل أداة سائدة في بعض الصناعات مثل الصناعات الهندسية الخاصة بالطائرات حيث تصنع خطوط الإنتاج أعدادًا قليلة من أجزاء معقدة. ستُحدث الطباعة الثلاثية الأبعاد في المستقبل اضطرابًا بالنظام الاقتصادي بطرق أكثر عمقًا؛ فسيحل محل سلاسل التوريد العالمية مصنِّعون أصحاب مشروعات صغيرة مستقلون ومتفاعلون لديهم قابلية سريعة

للاستجابة لتغير المخزون السلعي ومطالب السوق. وبنحو أقل مباشرة، ربما ستكون أكبر مساهمة لتقنيات الطباعة الثلاثية الأبعاد في الاقتصاد هي تقليل المخاطرات والمشكلات الناتجة عن تجرِبة نماذج أعمال جديدة.

## (١) نملٌ يدير مصانع

أحد نماذج الأعمال المستقبلية الذي ستمهد له الطريق كلٌّ من الطباعة الثلاثية الأبعاد وتقنيات التصميم الجديدة هو التصنيع السحابي. سيتكون التصنيع السحابي — وهو بديل للإنتاج الواسع النطاق — من شبكة من نقاط الإنتاج الصغيرة اللامركزية.

نحن على مشارف حِقْبة أنظمة كبيرة يتصل بعضها ببعض ويتداخل بعضها مع بعض لكنها مع ذلك لا مركزية. هناك البيانات الضخمة، وهناك الشركات الكبرى، وهناك شبكات مالية ضخمة تمتد لتغطي العالم. ولدينا أنظمة اقتصادية بيئية؛ حيث تؤثِّر الرياح الموسمية في تايلاند على هامش ربح مشروع صغير في حي بروكلين بنيويورك.

لكن لا يزال التصنيع الواسع النطاق عملية مركزية تتركز في أماكن نشاط متخصص لأنه يقوم على اقتصادات الحجم، ويتم الإنتاج في المصانع بينما يتركز تصميم المنتجات غالبًا في الشركات الاحترافية.

تأمَّل الطرق التي تغيرت بها صناعة الاتصالات على مر السنين؛ فيما مضى، كانت شبكات الهواتف كبيرة ومركزية وغير عملية. كان هاتف واحد عام يخدم العديد من الأحياء السكنية، وكانت كل عائلة تمتلك خط هاتف أرضي واحدًا.

اليوم، يمتلك نحو ٦٠ بالمائة من تعداد سكان العالم هاتفًا محمولًا. كل هاتف عبارة عن جهاز بالغ الصغر في حد ذاته، لكن عندما تجتمع مليارات الهواتف المحمولة حول العالم مكونة شبكة مُوزَّعة عبر العالم؛ فإن الأثر المشترك هو نظام عملاق قوي مخل بالنظام السائد.

ما زال التصنيع الواسع النطاق يشبه كابينة الهاتف وليس شبكة الهواتف المحمولة؛ لكن كل هذا سيتغير في المستقبل. ومثل المليارات من الهواتف المحمولة، فإن التصنيع ربما يتكون في يوم من الأيام من ملايين نقاط الإنتاج الصغيرة المستقلة.

الطباعة الثلاثية الأبعاد هي المحفز الذي كان التصنيع السحابي في انتظاره؛ فسيصبح التصنيع السحابي نظامًا لا مركزيًّا قائمًا على شبكات شديدة الضخامة من شركات التصنيع الصغيرة. تُعرِّف موسوعة «ويكيبيديا» التصنيع السحابي بأنه أنظمة

«يمكن فيها لموارد وقدرات تصنيع متعددة أن تُدرَك وتتصل معًا بنحو ذكي عن طريق شبكة اتصال أكثر اتساعًا، ويمكن كذلك أن تُدارَ ويُتحكم فيها آليًّا.»

يصف الكاتب كريس أندرسون في كتابه البارز «الذيل الطويل: مستقبل الأعمال في بيع القليل من الكثير»، القوة الجمعية للمدونين كتلك الخاصة بـ «نمل يحمل مكبرات صوت».[1] فقبل أن يتيح الإنترنت للكُتاب مِنصة عالمية، فقد عانَوْا لإيصال أصواتهم للعالم، أما الآن، فإن القدرة الجمعية للمدونين للتصريح بما يريدون قوله تفوق قدرة الصحفيين العاملين في الشركات الإعلامية الكبرى، وستحوِّل الطباعة الثلاثية الأبعاد الصناع والمستهلكين والشركات الصغرى إلى نملٍ يدير مصانع.

كل نقطة إنتاج فردية ستكون مستقلة لكنها متصلة بالنقاط الأخرى، وسيتشكل المصنِّعون ويعيدون التشكل في مجموعات مؤقتة، كما تدعو الحاجة حول مشروع محدد. لن تملي بعد اليوم اقتصادات الحجم نماذجَ الأعمال لأنه بالنسبة إلى أي جزء، لن تختلف التكلفة، سواء صنعت واحدًا منه أو عشرة آلاف. وكل شركة فردية ستكون قادرة على امتلاك جوانب إنتاج متعددة وصنع نطاق كبير من المنتجات أو الأجزاء المختلفة في وقت قصير وحسب الطلب. في بعض الأوقات، ستقوم هذه النقاط بحشد الموارد.

سيدعم مجالُ التصنيع السحابي الابتكارَ بتقليل عقبات الدخول إليه؛ فقد ازدهر الابتكار بنحو أسرع في صناعة البرمجيات بسبب أن تكلفة دخول هذه الصناعة أقل في العالم الافتراضي مما في العالم الواقعي؛ فمنتجات صناعة البرمجيات لا تُحفَظ في مخازن مادية، ولا يُصنَع البرنامج من أي مواد خام، ويحتاج إلى إجراءات تجميع وتوصيل أقل.

إليكم سيناريوهين مستقبليين:

الأول، تخيَّل أنك تحتاج إلى عشرة آلاف دبَّاسة مكتبية بعد غدٍ؛ ستضع ملف التصميم خاصتك، وتطلب ما تريد عن طريق سحابة التصنيع. واستجابةً لطلبك، فإن آلاف الشركات والمصنِّعين الصغار — كلٌّ يمتلك طابعة (أو طابعتين) ثلاثية الأبعاد — سيبدءون بطباعة العشرات من الدباسات وإيصالها إليك.

لكن انتظر، فهذا النموذج غير موفِّر مقارنة بالتصنيع الواسع النطاق لعشرة آلاف دباسة بسيطة التصميم؛ فالتصنيع السحابي لسلع بسيطة أمرٌ غير منطقي؛ فمن الأسرع والأرخص أن يُنتج على نطاق واسع عشرة آلاف دباسة متطابقة في بضع ساعات في أحد المصانع الذي يمتلك المواد الخام والآلات الجاهزة المتخصصة في إنتاج الدباسات بأعداد كبيرة.

لكن ماذا لو احتجت إلى دراجة بخارية بمواصفات خاصة بين عَشِيَّة وضحاها؟ ستعلن عن طلبك على نفس سحابة التصنيع. ستُكلِّف آلاف الشركات تلقائيًّا بمَهمة طباعة أجزاء مخصصة وشحنها إليك بمجرد أن تصبح جاهزة. في صباح اليوم التالي، ستستيقظ لتجد خارجَ منزلك كومة صغيرة من آلاف أجزاء الدراجة البخارية بالمواصفات المطلوبة، بعضها بلاستيكي وبعضها معدِني؛ بعضها كبير وبعضها صغير.

عند استخدام الحوسبة السحابية، فأنت لا تدري أين تقع قدرة السحابة الحاسوبية؛ فالموارد المرتكزة على السحابة قابلة للقياس ومتوازنة الحمل بنحو تلقائي. ولا يجب عليك القلق بشأن سعة الإنتاج عندما تستخدم سحابة التصنيع؛ ستوزع السحابة عملية الإنتاج بنحو ذكي، وتنسق بين الشركات الفردية داخل الشبكة لاستيعاب طلب التصنيع خاصتك بنجاح.

كل ما تقوم به هو وضع طلبك وضغط زر الإرسال.

ربما تكون أي شركة داخل سحابة التصنيع صغيرة في حد ذاتها، لكن — ومثل مليارات الهواتف المحمولة أو النمل الذي يدير مصنعًا — سيكون الكل أكبر من مجموع أجزائه.

## (١-١) حركة الصناع

تحدث الثورة التقنية عندما يستخدم الأشخاص العاديون أدواتٍ جديدة، ويطبقون استخداماتها في حياتهم اليومية. والتوافر هو ما يتيح للتقنيات الجديدة إحداث ثورة. لم تصبح الطباعة الثلاثية الأبعاد بعدُ تقنيةً متوافرة في المنازل، لكنها تخطو خطواتها الأولى في هذا الاتجاه؛ بفضل مجتمع نابض بالنشاط وآخذ في النمو من الصُّنَّاع.

حركة الصناع هي احتفاء بالابتكار الخاص بالصنع الذاتي، ولا يعرف أحد على وجه الخصوص مِن أين أتت كلمة «الصنَّاع»، لكنها بقيت جزءًا من هذا المصطلح الشائع. فكرة الصانع تشبه ما تسميه شركات البرمجيات بالمستخدم المحترف. ومثل مصطلح «قراصنة الكمبيوتر» الذي يصف الأشخاص الذين يطوعون البرمجيات للقيام بما يريدون، فإن الصنَّاع يطوعون التكنولوجيا لتنفيذ ما يريدون.

تُعتبر شركة أورايلي ميديا مقياسًا موثوقًا به لتسجيل ما يهتم به محبو التكنولوجيا. في عام ٢٠٠٥، أطلقت الشركة مجلة تدعى «ميك» للتواصل مع «مجتمع مُتَنامٍ من أصحاب الموارد الذين ينفذون مشروعات مدهشة في أفنيتهم الخلفية وأقبائهم ومرائبهم.» أصابت

أورايلي هدفها، وتطورت المجلة إلى مجموعة من الفعاليات والمنشورات التي تحتفي بحركة الصنع الذاتي. وأصبح معرض الصناع — أعظم عرض (ونقاش) على وجه الأرض — مكانَ تجمُّع لمن يحبون صنع الأشياء أو يحتفون بما يصنعه الآخرون. وتنتشر معامل وورش عمل المبتكرين في كل المدن حول العالم.

يعمل من ينضمون تحت لواء حركة الصناع على كل أنواع التقنيات وليست الطباعة الثلاثية الأبعاد فقط؛ فبعض من يطلقون على أنفسهم لقب صُنَّاع يصممون دوائر إلكترونية أو يصنعون ملابسَ أو أدوات موسيقية ذكية تلمع كرد فعل للنغمة، أو يصنعون الروبوتات خاصتهم. وتجتذب الحركة من يهوون أدوات الإنتاج ويمتلكون آلات حفر وتقطيع بالكمبيوتر وآلات تفريز في أقبائهم.

ما الذي يدفع شخصًا إلى أن يرغب في قضاء ظهيرة يوم العطلة في تجميع طابعة ثلاثية الأبعاد؟ أو يثبِّت مكونات كهربية بالغة الصغر معًا بكل صبر ليجعل لعبة مطبوعة بتلك الطابعة تمشي؟ هناك العديد من الأسباب؛ بعض الناس يحبون القيام بكل شيء بأنفسهم، آخرون — ومنهم أنا — يجدون متعة في حل مشكلة مادية الآن بدلًا من تأجيلها لشهور، والفرحة هي قوة دافعة بنحو كبير؛ لكنني أظن أن هناك ما هو أكثر من هذا في الأمر.

يبتكر الصناعُ أشياءَ جميلة؛ تصفَّح مواقع مثل فليكر، أو ابحث في جوجل باستخدام مصطلح «الأشياء المصنوعة بنحو ذاتي والمطبوعة بنحو ثلاثي الأبعاد» وستجد أشكالًا زخرفية ونماذجَ سكك حديدية مصغرة وقطع شطرنج شفافة. تجول في معرض للصناع، وسترى الإبداع الذي يَقدِر البشر على تحقيقه إذا ما توافر لهم الوقت والموارد. أحد المعروضات التي ظلت عالقة في عقلي هو «سيارة الأسماك» التي رأيتها في أحد تلك المعارض في حي كوينز بنيويورك في عام ٢٠١١. كانت جوقة الأسماك تتكون من ٢٥٠ سمكة وسلطعون كهروميكانيكية مخصصة تهتز وتغني على سطح إحدى السيارات.

لا يوجد الكثير من المعلومات المحددة المتعلقة بخلفية ودوافع من يسمون أنفسهم بالصُّنَّاع. قرأتُ استطلاعًا — وهو واحد من عدد قليل صادفته — طرح أسئلة ديموغرافية محددة على الأشخاص التابعين لمجتمع صناع خاص بالطباعة الثلاثية الأبعاد. ضم الاستطلاع ٣٨٥ فردًا وأجْرته مؤسسة تدعى «مانيفكتشرينج إن موشن».

ما توصل إليه الاستطلاع هو أن الصناع — مثل قراصنة البرمجيات — يكونون عادةً ذكورًا موسرين من أوروبا أو أمريكا الشمالية، بينما بلغت نسبة الصناع الإناث




لافتة ترشد رواد أحد معارض الصناع في عام ٢٠١٠ في حي كوينز بنيويورك.

٧ بالمائة ممن شاركوا في الاستطلاع. يكون الصناع من الحاصلين على تعليم عالٍ؛ إذ يحمل نحو ٦٠ بالمائة ممن شاركوا في الاستطلاع درجة جامعية على الأقل.

طرح الاستطلاع سؤالًا رئيسيًّا: لماذا تحب صنع الأشياء؟ أكثر من ٨٠ بالمائة ممن أجابوا على السؤال قالوا إن هذا يرجع لاستمتاعهم بالطباعة الثلاثية الأبعاد، التي عرَّفتهم بأشخاص آخرين يحبون كذلك صناعة الأشياء. ثمانية وتسعون بالمائة ممن أجابوا على السؤال قالوا إن صنع الأشياء بالإلكترونيات والبرمجيات والطابعات الثلاثية الأبعاد كان متعة حقيقية على الطراز القديم.

أحد أفضل الأمور بشأن حركة الصناع هي حقيقة أن الربح ليس الحافز الرئيسي لروادها؛ فيمكن للصناع أن يكونوا مَرِحين ويخاطروا إبداعيًّا؛ لأنهم ليسوا خاضعين لأي سلاسل توريد ضخمة وآلاف الموظفين وحملة الأسهم الغاضبين ومسئوليات أخرى

تستغرق وقتهم، ويجب على المصممين والمصنِّعين الاحترافين التعامل معها. القيم الرئيسية لحركة الصانع هي المساهمة في المجتمع والإبداع والتغيير الاجتماعي وحل المشكلات.

ربما لم تجسِّد حركةُ الصناع بعدُ البوادرَ الأولى للثورة الصناعية المتكاملة. مع ذلك، فإن الصناع يلعبون دورًا حساسًا في نشر الوعي بتقنيات الطباعة الثلاثية الأبعاد بين الناس. يعرض الصناع — مثل أوائل من تبنوا التقنيات المخلة بأي نظام سائد — ما يمكن أن يصبح يومًا ما ممكنًا على نطاق أوسع.

من المغري مقارنة الطباعة الثلاثية الأبعاد بحركة أجهزة الكمبيوتر الشخصية المبكرة في سبعينيات القرن الماضي أو تشبيهها بثورة صناعية جديدة. لقد قمتُ بهاتين المقارنتين عددًا قليلًا من المرات على الأقل، والتشابهات بينهما مثيرة؛ بسبب صعوبة وضع وصف دقيق للآثار الاجتماعية الكاسحة التي ستُخلِّفها تقنيات الطباعة الثلاثية الأبعاد.

تأمَّل أوجه التشابه؛ بدأت الطباعة الثلاثية الأبعاد — مثل أجهزة الكمبيوتر المركزية — في المجال الصناعي. كانت أول أجهزة الكمبيوتر الشخصية بدائية وقليلة التكلفة وتُجمع في المنزل. وكان أول من بدءوا الاعتماد على أجهزة الكمبيوتر الشخصية يشبهون من بدءوا الاعتماد على الطباعة الثلاثية الأبعاد في المنزل فيما يخص التركيبة السكانية.

هناك عامل آخر مثير للتعقيد يزيد من جاذبية التشابه مع حركة أجهزة الكمبيوتر الشخصية والثورة الصناعية، وهو أن الطباعة الثلاثية الأبعاد ليست مجرد تقنية مُفرَدة؛ بل هي تقنية عبارة عن منصة كبيرة ستسحب معها تقنيات أخرى في أثرها، والتقنيات المماثلة التي تُحدث تغييرًا جذريًّا مثل المحرك البخاري أو التلغراف كان لها أيضًا تأثير كبير في كل اتجاه.

## (٢) اقتصاد التجرِبة

تنبأ الكاتبان جوزيف باين وجيمس جيلمور في كتابيهما «اقتصاد التجرِبة» أن المِيزة التنافسية لأي شركة ستزيد بِناءً على قوة تجرِبة العميل. يوضح باين وجيلمور أن الاقتصاد تطور عدة مرات بالفعل، من الاقتصاد الزراعي إلى الاقتصاد الصناعي إلى اقتصاد الخدمات، السائد في عصرنا الحالي.[2]

في اقتصاد التجرِبة الذي يتحدث عنه باين وجيلمور، تقع قيمة المنتج في مكان ما على سلسلة متصلة من قوة التجرِبة. «المنتجات الأساسية» — وهي المنتجات المعتادة والشائعة — تُعَد الأقل قيمة بالنسبة إلى العملاء. بالنسبة إلى المستهلك، فإن هذه المنتجات مملة

لكنها ضرورية مثل مياه الشرب الموجودة في كل مكان والتي لا تتسم بأي شيء استثنائي. وعلى الرغم من أن منتجات مثل منظف الصحون أو ممسحة الأرجل عادية، فإن المستهلك يحتاج إليها لكنه لن يدفع فيها ما يزيد على ثمنها الحقيقي.

ما يسميه باين وجيلمور «السلع»، أو المنتجات المتفردة والمتميزة، تمتلك جاذبية أكبر لدى للمستهلكين. ويمكن أن تكون هذه السلع حذاءً للركض من علامتك التِّجارية المفضلة، أو طرازك المفضل من دراجة متطورة. وتأتي المنتجات الخدمية في مرتبة متقدمة عن السلع، فيما يتعلق بقيمتها للمستهلك، فيُقدِّر المستهلكون المنتجات الخدمية التي تعطيهم ناتجًا ملموسًا مثل إعداد الكشوف الضريبية أو تسريحة شعر مناسبة.

تفسر السلسلة المتصلة الخاصة بباين وجيلمور الجاذبية القوية للمنتجات والتقنيات التي تتيح الابتكار الخاص بالصنع الذاتي. في الترتيب الهرمي خاصتهما، فإن المنتجات التي تقع في قمة سلم القيمة هي المنتجات التي تتيح للمستهلك تجرِبةً، وقبل كل شيء، تغييرًا جذريًّا. فتتيح منتجات التجرِبة شعورًا مثل متعة الذهاب للسينما أو الراحة عند التوجه لأحد المنتجعات العلاجية. أما المنتجات ذات التغيير الجذري، فتُحدث تحولًا عميقًا في مستهلكها مما ينتج عنه فائدة ذات أثر إيجابي على المدى البعيد: على سبيل المثال، الحصول على درجة جامعية أو قضاء بضعة أشهر في معسكر صيفي أو اكتساب مهارة جديدة.

في اقتصاد التجرِبة، ستكون أنجح الشركات صاحبة أكبر هوامش الأرباح هي التي تبيع لعملائها المنتجات أو السلع التي تتيح لهم تجرِبة أو تغييرًا جذريًّا. يتميز كلٌّ من التجرِبة والشعور بالتغيير بالقوة والعلوق بالذاكرة. ويدفع المستهلكون أعلى أسعار لمثل هذه الأشياء، وسيذهبون للحصول عليها مرارًا وتكرارًا.

يتيح الابتكار المصاحب لعملية الصنع الذاتي مجموعة غنية من التجارِب وعمليات التغيير، ويمد من يقومون به بإحساس بالانتماء للمجتمع وفرصة لاكتساب مهارات جديدة، لم يكن الحصول عليها سهلًا، ورضًا ناتجٍ عن تصميم وتصنيع الأشياء. وتتيح لنا تقنيات الطباعة الثلاثية الأبعاد الارتقاء فوق كل ما هو معتاد، والخروج من عالم المنتجات الأساسية والتجارِب المملة، وتَستغل العديد من الشركات الرائدة حاليًّا في بيع الطابعات الثلاثية الأبعاد أو الخدمات ذات الصلة حاجةَ المستهلك في الحصول على تجارِبَ فارقةٍ وقوية ولا تُنسى.

## (٢-١) شركة ميكربوت

تتيح شركة ميكربوت إندستريز لعملائها مزيجًا جذَّابًا من الإبداع والانتماء والتحديات التقنية؛ فهي تبيع طابعات ثلاثية الأبعاد شخصية بأسماء جذابة مثل «كب كيك»، وأحدث الطرازات معاصرة هما «ريبليكيتور ١» و«ريبليكيتور ٢». أحد مؤسسي الشركة بري بيتيس هو أحد خبراء التسويق الذي صاغ صورة وجاذبية الشركة بكل مهارة.

أحد أصدقائي معجب بقدرة شركة ميكربوت على تحويل آلة مملة نسبيًّا للتصنيع بالإضافة إلى تجربة اجتماعية مبدعة ومرحة. يفسِّر صديقي هذا الأمر قائلًا: «عندما تفكر في ميكربوت، تشعر — لسببٍ ما — أنك تريد «احتضان» القائمين عليها.» يتواصل عملاء الشركة المخلصون والمتحمسون عبر موقع الشركة thingiverse.com حيث تعكس النقاشات ثقافة الصنع الذاتي المرحة الخاصة بالشركة.

تتيح مدونة ميكربوت — مثل المجلات الخاصة بأنماط الحياة التي تتيح لقرائها وصفات مُعَدة لعطلات معينة — مشروعات وأفكارًا للطباعة؛ لمساعدة قرائها على الاحتفال بعطلة يوم الذكرى أو الكريسماس أو عيد الاستقلال. وتحتفل ميكربوت بعطلات خاصة مثل «يوم الاحتفاء بمهووسي التكنولوجيا». للاحتفال بهذا اليوم بنحو مناسب. يمكن للمستخدمين تنزيل ملفات تصميم لطباعة حوامل المناشف الخاصة بهم أو تمثال مصغر لهان سولو محصور في الكربونايت أو نظارة سوداء سميكة الإطار أو سلسلة مفاتيح لمهووسي التكنولوجيا.

وقت كتابة هذا الكتاب، كانت شركة ميكربوت تنهي مرحلة نمو مكثفة ومحمومة، وكانت تعمل على نقل مقرها الرئيسي من الشوارع الصاخبة القذرة للمِنطقة الصناعية ببروكلين إلى مِنطقة الأعمال بمانهاتن. ومن السهل النظر إلى نجاح ميكربوت على أنه نجاح حدث بين يوم وليلة بسبب الاهتمام الإعلامي المفاجئ بها. لكن مؤسسي الشركة — آدم ماير وزاك سميث وبري بيتيس — ظلوا يعملون لبضع سنوات غير معروفين، مدعومين بالمال من أصدقائهم وعائلاتهم.

عندما زرت مقر الشركة، كان المشهد يزخر بالفوضى المليئة بالطاقة والنمو الجامح. قام مؤسسو الشركة بعمل متقن لتحويل الشركة من شركة ناشئة يقوم عليها ثلاثة أفراد فقط وتعتمد على نحو عميق على فكرة الصنع الذاتي إلى الشركة التي توجد اليوم، الماهرة في التعامل مع وسائل الإعلام، والممولة بنحو جيد. وبفضل المظهر العام المرح



طابعات ثلاثية الأبعاد حديثة تُعد للشحن في مستودع «بوت كيف» الخاص بشركة ميكربوت في بروكلين عام ٢٠١٢.

والجذاب، والظهور الرائع في برنامج الإعلامي ستيفن كولبير — حيث دخل آدم وبري وزاك التاريخ بطباعتهم الثلاثية الأبعاد لنسخة بلاستيكية طبق الأصل من رأس كولبير — فإن ميكربوت تتمتع بمبيعات متزايدة على نحو دائم.

لا تكمن عبقرية ميكربوت في تقنيتها؛ فللإبقاء على الأسعار في نطاق متاح للمستهلكين، تستخدم طابعات «كب كيك» و«ريبليكيتور» الثلاثية الأبعاد أساليب طباعة بدائية من الناحية التقنية وتطبع ما تُنتجه باستخدام البلاستيك. لكن تكمن عبقرية ميكربوت في روح المرح التي تشيعها، وقدرتها على جعل التصميم والتصنيع تجرِبة مرحة ومُوحِّدة وفارقة لعملائها.

## (٢-٢) شركة شيبوايز

في ضوء توافر أدوات التصميم والإنتاج القوية للجميع، بدأت الفوارق بين المحترف والهاوي، والبائع والمشتري، والمصمم والمستهلك، في التلاشي؛ فإذا كانت ميكربوت هي

المتعهد للطابعات الثلاثية الأبعاد والمجتمعات الإلكترونية التي تجسد الإبداع الحر، فإن شركة شيبوايز تُمثِّل سوقًا مبتكَرةً للتصميم. شيبوايز هي مجتمع/سوق إلكترونية تستضيف منافذ للمصممين، وتطبع الأشياء بنحو ثلاثي الأبعاد؛ من أجل المستهلكين الذين يُرسلون ملفات التصميم خاصتهم.

كانت شيبوايز في هولندا لكنها نقلت مقرها الرئيسي إلى مدينة نيويورك الأمريكية في عام ٢٠١١. ومثل شركة ميكربوت، فإن الشركة تنمو بإيقاع سريع؛ ففي نهاية عام ٢٠١٢، افتتحت الشركة مصنعًا يضم ٥٠ طابعة ثلاثية الأبعاد في حي لونج آيلاند سيتي، في خطوة أسعدت السياسيين المحليين الذين قصوا شريط الافتتاح باستخدام مقص مطبوع بنحو ثلاثي الأبعاد.

زرنا مقر شيبوايز في نيويورك الذي كان — مثل ميكربوت — يضج بالنمو السريع والمبهج. كان البهو الخاص بالمبنى الطويل في وسط مانهاتن، الخاص بالشركة، مليئًا بالسقالات الخشبية هنا وهناك، كما أزال أحدهم أسماء الشركات من البهو والمصعد، وبعد العديد من الرحلات غير المثمرة صعودًا وهبوطًا، وجدنا مقر شيبوايز في الطابق التاسع.

استقبلنا روبرت سكوينبرج، أحد مؤسسي الشركة. كنت قد قابلت روبرت شخصيًّا منذ بضع سنوات في مدينة أيندهوفن الهولندية عندما كانت شيبوايز تتكون من بعض الموظفين، وكان «مصنعها» يتكون من ست طابعات ثلاثية الأبعاد في مبنى في منطقة صناعية ريفية. ومثل أي مُضيف كريم، حيَّانا روبرت وقدَّم لنا قهوة الإسبريسو الساخنة في قدحين مطبوعين بنحو ثلاثي الأبعاد كلٌّ منهما بستة مقابض صغيرة.

قبل مشاركة روبرت في تأسيس شيبوايز في عام ٢٠٠٧، كان يعمل كقرصان إلكتروني «أبيض» في شركة استشارات كبرى؛ حيث كان يعمل على اختراق شبكات الكمبيوتر الخاصة بالشركة لمعرفة الثغرات الأمنية، ويُعد الانتقال من شبكات الكمبيوتر إلى خدمات الطباعة الثلاثية الأبعاد أمرًا منطقيًّا إذا نظرت لشيبوايز من منظور روبرت باعتبارها «منصة للتصنيع الشخصي تفيد كلًّا من المستهلك والمحترف.» ينظر روبرت لمستقبل الطباعة الثلاثية الأبعاد للمستهلك كمستقبل قائم على فكرة «المنصة» الموجهة لتقديم الخدمات بدلًا من التصنيع داخل المنزل.

يقول روبرت: «تشبه شيبوايز منصة أمازون في كونها منفذًا يتيح للناس بيع منتجاتهم. في عام ٢٠٠٢، أرسل جيف بيزوس لموظفي أمازون مذكرة داخلية تفيد بأن أمازون ستتحول لشركة قائمة على منصة خدمات.» كان هدف بيزوس — الذي غيَّر



قدح إسبريسو مخصص مطبوع (ومُستخدَم) في مقر شركة شيبوايز.

مستقبل التجارة الإلكترونية — هو أن كل فريق داخل الشركة يجب عليه عرض بياناته للفرق الأخرى وللعالم الخارجي باستخدام واجهات برمجة التطبيقات. وبعد مرور ما يزيد على العقد، أصبحت أمازون أكبر منصة تجارة إلكترونية على الإنترنت، وتتيح معلومات مُؤَتْمتة لبائعي المنتجات والمخازن وشركات البرمجيات الأخرى في العالم الخارجي.

في الوقت الذي ربما توجه فيه استراتيجية المنصة نموذج عمل شيبوايز، فإن سحر هذه الاستراتيجية يكمن في حرفية مصمميها، والنطاق الواسع للمواد الخام التي يمكن للناس استخدامها في الطباعة؛ فإذا اشتريت طابعة ثلاثية الأبعاد لك، فأمامك الاختيار من بين الألوان المختلفة للبلاستيك. في وقت تأليف هذا الكتاب، كانت شيبوايز تتيح لعملائها الاختيار من بين ٢٥ نوعًا مختلفًا من المواد الخام، وهي تبيع كل شيء، بدءًا من الأجزاء الصغيرة المخصصة لسوار خاص بالمصمم مارك بلومفيلد من شركة إلكتروبلوم حتى الحرفية الفنية المجردة لأستاذ علوم الكمبيوتر فرانشيسكو دي كوميتيه. بدأ أصحاب المتاجر الإلكترونية التابعة للمنصة بالفعل في كسب المال وهو ما يعادل بضع مِئات آلاف من الدولارات الأمريكية في العام.

حتى الآن، لم يغامر مصممو ومشترو شيبوايز بتصنيع الاحتياجات التصنيعية اليومية مثل طباعة أجزاء السيارات أو صنع قوالب الحَقْن. بالقرب نوعًا ما من عالم التصنيع التقليدي يقع مشروع رائد آخر للصنع الذاتي يسمى «وان هندريد كيه جراجز» يغطي عوالم متعددة مثل المستهلكين والهواة المهرة والاحترافيين أصحاب الوظائف الإضافية. أقام مؤسِّسَا هذه الشركة، تيد هول وبيل يانج، مجتمعًا إلكترونيًّا حيث يمكن للصناع والمشترين الحصول على منتجات حسب الطلب مصنوعة «كما تريد بالضبط».

## (٢-٣) شركة وان هندريد كيه جراجز

قال تيد هول: «لا يوجد من يستطيع كسب العيش بالعمل متفرغًا في صناعة الأشياء للناس.» إن العديد من المستخدمين النشطين هم عبارة عن شركات تصنيع صغيرة احترافية تمتلك آلات حفر وتقطيع بالكمبيوتر أو طابعة ثلاثية الأبعاد، وتريد كسب المزيد من المال. وأضاف تيد: «على الرغم من ذلك، نسمع من الصناع والمشترين أنهم يجدون بعضهم بعضًا على مجتمع وان هندريد كيه جراجز حيث يبنون علاقات فيما بينهم ثم يلتقون في العالم الواقعي من أجل تعاقدات أكبر.»

بدأت الشركة كشراكة بين شركتي بونكو وشوب بوت تولز. ينشر المستهلكون المشروعات على موقع الشركة، وتحدث مزايدة بين الصناع الهواة والمصنِّعين الاحترافيين على تنفيذها. يقع مقر شركة بونكو في نيوزيلندا، وهي مُجمَّع لخدمات التصنيع والتصميمات المخصصة، وهي تحب وصف نفسها بأنها «أسهل نظام تصنيع في العالم». يقع مقر شركة شوب بوت تولز في الولايات المتحدة، وهي تصنع وتبيع آلات تصنيعية خاصة بالحفر والتقطيع بالكمبيوتر.

على الرغم من أن الإنترنت سهَّل لمجتمعات المختصِّين التواصل بعضهم مع بعض، فإن تيد وبيل وجدا أن الناس ما زالوا ينجذبون لمن هم قريبون منهم، إذا أمكنهم هذا. لا يختار عملاء الشركة من سيصنع ما يريدون طبقًا لقربه منهم. لكن — وكما قال تيد: «إذا صمم شخص شيئًا ما، فإنه يُفضِّل الذهاب لأي صانع محلي لصنع النموذج الأولي. وإذا انتهى به الحال لمرحلة بيع المنتج، فإنه سيبحث عن متاجر بالقرب من عملائه حتى يمكنه استخدام المواد الخام المحلية.»

تقنيات الدفع السهلة مثل باي بال تسهل التعاملات الإلكترونية بين مستخدمي موقع الشركة. لا تقدِر المتاجر الصغيرة على شراء المواد الخام مقدمًا. أوضح تيد هذا الأمر

قائلًا: «معظم الصناع يُفضِّلون الحصول على المال قبل استثماره في المواد الخام ووقت التصنيع.»

هناك تقنية أخرى تساعد الاقتصاد القائم على الإنترنت وهي التقييم الإلكتروني من جانب المستخدمين. قال تيد: «نحن لا نقوم بعملية اعتماد، وأفضل طريقة للصانع لاعتماد نفسه هي نشر صور لأعماله على الموقع. أضف إلى هذا التقييمات الإلكترونية للمستخدمين. هذا نظام فعَّال للغاية.»

## (٣) اقتصاد مستقبلي قائم على المنتجات القابلة للطباعة

تنتشر التقنيات ونماذج العمل الجديدة عبر الإنترنت بسرعةٍ انتشارَ النار في الهشيم. على العكس، فإن الابتكار في التصنيع عملية بطيئة وحذرة. بروس كريمر هو مدير برنامج لمؤسسة العلوم الطبيعية الأمريكية وداعية لفترة طويلة للطباعة الثلاثية الأبعاد وأدوات التصنيع الشخصية. تقول تجرِبته إن الابتكار في التصنيع لعبة يترتب عليها الكثير؛ الكثير جدًّا في واقع الأمر. يقول بروس: «لتحقيق الابتكار، يحتاج التصنيع إلى تقنيات جديدة تمكِّنه من أن يصبح أقل تجنبًا للمخاطر، وأن يشبه أكثر الإنترنت ومجتمعات البرمجيات في توجهها.»

اليوم، يُشكِّل التصنيع الواسع النطاق العمود الفقري لاقتصاد العالم؛ فحجمها الكبير وتعقيدها وتجهيزاتها المادية تجعل الابتكار ينطوي على مخاطرة، ويجب على شركات التصنيع الكبرى التجريب بحذر، كما أن الاتجاه الرئيسي للتصنيع هو تقليل التكاليف الإضافية، والعمل ضمن الحدود الخاصة بضوابط مكان العمل والبيئة، ونقل السلع المادية من مكان لآخر بكفاءة.

تقلل الطباعة الثلاثية الأبعاد من مخاطرة وتكلفة تقديم منتجات جديدة للسوق، ويتيح تقليل الاستثمار المبدئي لصغار المصنِّعين صنع عدد قليل من المنتجات في وقت واحد؛ استجابةً لطلب العميل وزيادة نطاق إنتاج المنتجات التي تُباع فقط. على سبيل المثال، إن إنتاج غطاء واقٍ للهاتف المحمول باستخدام العملية التقليدية للقولبة بالحقن يتطلب استثمارًا في قالب سيتكلف عشرة آلاف دولار على الأقل. هذا الاستثمار المبدئي يمكن استرداده فقط من خلال بيع عدد كبير من الأغطية الواقية. الأهم من ذلك أن هذه التكلفة تخلق «صدامًا مع الابتكار» يمنع تجرِبة الأفكار الصغيرة حتى تُسترد التكلفة تمامًا. لكن، وكما سيخبرك أي عالم في الأحياء التطورية، فإن الابتكارات التي تقود للإنجازات الكبرى عادةً ما تتكون من تتابع للعديد من الأفكار الصغيرة.

بمساعدة الطباعة الثلاثية الأبعاد، يصبح من الممكن تجرِبة العديد من الأفكار الصغيرة. وتواجه الشركات الصغيرة أو الأفراد مخاطر مالية أقل إذا كان يمكنهم صنع وبيع منتج لم يُختبر بأعداد صغيرة لاختبار رد فعل السوق تجاهه. وببدء مشروع جديد على نطاق صغير باستخدام الطباعة الثلاثية الأبعاد في الإنتاج، لا يجب عليه استثمار المال في الآلات والبنية التحتية الأساسية المرتبطة بالبيئات الصناعية الحالية.

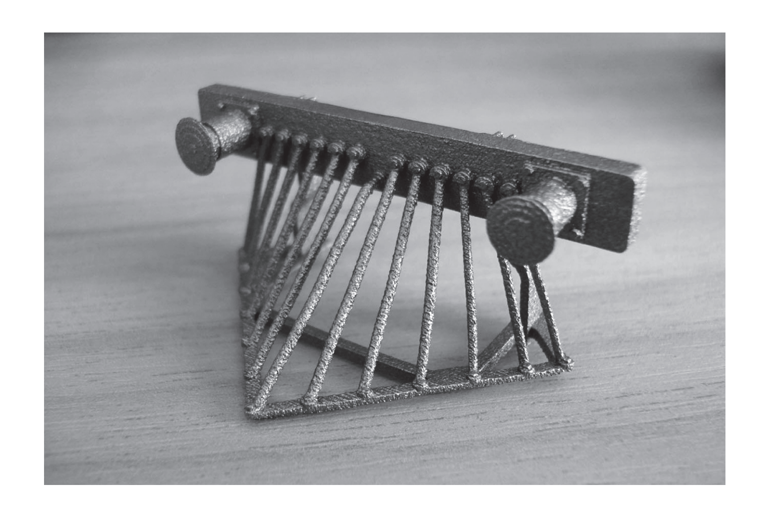
## (٣-١) التدرج في الإنتاج: لا تترك وظيفتك الأساسية

الصدام مع الابتكار ليس شأنًا يخص الشركات الكبرى فقط؛ فهو أمر وثيق الصلة بالمبتكرين الأفراد كذلك. إن أي نماذج عمل جديدة في أي صناعة تُفعل بإتاحة أدوات الإنتاج للجميع، وتحرر أدوات التصنيع الشخصي رواد العمل من عبء توفير المهارات وموارد رأس المال، وسيقدِر رواد الأعمال في المستقبل على تجرِبة المزيد من المنتجات ونماذج الأعمال الجديدة حتى أكثر من ذي قبل من دون أي استثمار مبدئي تقريبًا.

سيستطيع رواد الأعمال ممن لديهم أفكار لمشروعات جديدة إثبات نجاح فكرتهم لأنفسهم وللمستثمرين المحتملين، أو ربما حتى يؤجلوا الحاجة للاستثمار بالكلية. هذا النموذج من نماذج الأعمال — الذي غالبًا ما يُشار إليه ب «التدرج في الإنتاج» — يحرر التصنيع وتجارة التجزئة بتقليل حواجز الدخول إليهما.

إن إطلاق أي منتج جديد اليوم يتطلب من صانعه أن يبدأ الإنتاج على نطاق واسع؛ فآلات التصنيع الكبرى ليست مصممة لصنع منتج واحد فقط في كل مرة. ويجب على من يرغبون أن يصبحوا رواد أعمال تدبير كَميات كبيرة من المواد الخام، والاستثمار في وقت تشغيل آلات المصانع؛ للاستفادة من اقتصادات الحجم ودفع المال لوضع منتجاتهم على رفوف متاجر التجزئة.

بمساعدة الطباعة الثلاثية الأبعاد، يمكن للناس الحفاظ على وظيفتهم الأساسية بينما يستكشفون قدرة السوق على قبول منتج جديد وانتهم فكرته. لا تتعرض صغار الشركات للمخاطر المالية المتعلقة باستثمار المال في شراء آلات مكلفة وحجز أماكن لمنتجاتها على رفوف المتاجر ربما لن يستخدموها والاستعانة بخبرات فنية. من يعيشون ضمن اقتصاديات الكفاف في الدول النامية من دون امتلاك رأس المال سيقدِرون على بدء التصنيع في مراكز تصنيع محلية من دون الحاجة لرأس المال لدفع ثمن بنية تحتية أساسية ربما لا تُستخدم نهائيًّا.



يصمم مارك كيندريك ويبيع أجزاء قطارات فريدة مصنوعة من الصلب غير القابل للصدأ. يُباع هذا المصد المطبوع بتقنية ثلاثية الأبعاد على موقع شركة شيبوايز (الصورة مهداة من مارك كيندريك).

تقلل الطباعة الثلاثية الأبعاد من تكلفة دخول مجال تصنيع الأشياء، وستتيح لرواد الأعمال طريقًا للسوق أقل تكلفة ومخاطرة. وبدلًا من جمع المال لإقامة مصنع، يمكن لرواد الأعمال صنع عينة أو اثنتين بطابعة ثلاثية الأبعاد لاختبار مدى صلاحية فكرتهم؛ فإذا بيعت العينات الأولى، فيمكنهم صناعة المزيد حتى لو احتاجوا لتعديل التصميم حسب طلب المشتري. وإذا استمر الطلب على العينة، فيمكنهم توسيع إنتاجهم بإقامة مصنع تقليدي أو استثمار المال في عدد أكبر من عمليات الطابعات الثلاثية الأبعاد.

## (٣-٢) الدفع مقابل الطبع: تطبيقات التصنيع

ستنبثق تصميمات المستقبل للطباعة الثلاثية الأبعاد من أماكن غير متوقعة. ماذا إذا كنت تريد أن تصمم وتطبع — بنحو ثلاثي الأبعاد — فرشاةَ شعر أفضل؟ من غير المحتمل أنه يمكنك تصميم فرشاة مناسبة وآمنة وملائمة للمستخدم؛ حتى لو بدت الفرشاة منتجًا

بسيطًا، فتصميم فرشاة ناجحة يستغرق سنوات من التجارِب والمهارات. لكن مع ظهور الطابعات الثلاثية الأبعاد، يمكن لأي شخص ليس لديه أي خبرة تصميم المنتج خاصته.

أحد الموارد المستقبلية للتصميمات الجاهزة للطباعة ربما يكون تطبيقات تصنيع قابلة للتنزيل أو ما يُسمى اختصارًا بـ «تطبيقات التصنيع» (فاب آبس) (وهو مصطلح ابتكره تلميذاي السابقان دانيال كوهين وجيف ليبتون). تطبيق التصنيع — مثل تطبيق هاتف الآي فون المحمول — سيغطي نطاقًا ضيقًا من التطبيقات لكنه في نفس الوقت سيتيح للمستخدم التوازن الصحيح بين التخصيص وسهولة الاستخدام.

هذا التطبيق سيتكلف ٩٩ سنتًا، ويمكنك شراؤه لحاجة معينة مثل صنع مجموعة من المسكات ذات المواصفات الخاصة لمقابض دراجتك. وبعد شرائك للتطبيق عبر الإنترنت، سيرشدك خلال عملية التصميم. وستُحمل صورة لديك ومسحًا ضوئيًّا سريعًا لمقابض دراجتك الحالية (لضمان أن تتناسب المسكات الجديدة بنحو مثالي). الخطوة الأخيرة هي اختيار اللون ونوع المادة الخام والنقر على زر الطباعة، وفي غضون دقائق ستمتلك — بكل فخر — مجموعة جديدة من ممسكات مقود الدراجة المصنوعة، حسب الطلب والملائمة ليديك تمامًا.

ستتيح تطبيقات التصنيع لمحترفي التصميم المستقبليين نموذجًا جديدًا للعمل لدمج خبراتهم في التصميم داخل اقتصاد متنامٍ من التصنيع المُوزَّع. ومثل تطبيقات الآي فون، ستؤدي تطبيقات التصنيع لظهور اقتصاد جديد. وستجد التطبيقات الصغيرة المخصصة للطباعة بيئتها المناسبة في أسواق ذات نطاق ضيق ومعقد، والتي تكون صغيرة بحيث لا تجذب انتباه شركات التصنيع الكبرى لكنها كبيرة بما يكفي لإتاحة الفرصة للأفراد والشركات الصغيرة.

## (٣-٣) التعديل المستمر وتنوع المنتج

لماذا ترجُّ بعض التقنيات أركان عالمنا بينما تدخل أخرى حياتنا اليومية دون أن تؤثِّر فيها بنحو كبير؟ تحدث دفعات الابتكار عندما تُزيل تقنيةٌ ناشئةٌ ما كان فيما مضى حاجزًا مانعًا يتعلق بالتكلفة أو المسافة أو الوقت. تلغي الطباعة الثلاثية الأبعاد تكلفتين تمامًا: تكلفة التعديل وتكلفة صنع الأشكال المعقدة.

بما أن تعديل التصميم مكلف، فإن تنوع المنتجات مكلف كذلك، ولا يمكن للشركات تزويد عملائها بكل التنوع الذي يرغبون فيه، كما أن معرفة أي نوع من التنويعات في المنتجات التي يُفضِّلها العملاء أمر مكلف وعرضة للخطأ.

مجموعات التركيز بطيئة ومكلفة. ربما يفلح قياس إمكانيات المنافسين لكنه ما زال أمرًا غير مؤكد. بالنسبة إلى المنتجات المعقدة التي تتيح الكثير من الخيارات، وتنافس في أسواق متغيرة دائمًا، فإن الأنماط التقليدية لأبحاث السوق تصبح قديمة بمجرد انتهاء التحليل.

إن الشركات الناشئة بنحو خاص لا يمكنها امتلاك أدوات بحث تقليدي للسوق. وفي كتاب «الشركة الناشئة المرنة»، يقترح إيريك رايس أنه يجب على الشركات استكشاف وتجرِبة العديد من الأفكار الجديدة في نفس الوقت وتعديل استراتيجياتها بنحو فوري.[3] يقول رايس إن الشركات الناشئة يجب أن تقوم بسلسلة مستمرة ومنتظمة من التجارِب الصغيرة القليلة التكلفة.

ستساعد الطباعة الثلاثية الأبعاد الشركات في اختبار منتجات جديدة في السوق بنحو سريع وتعديلها حسب ردود أفعال السوق. وبطباعة نسخ معدلة من المنتج بنحو ثلاثي الأبعاد، يمكن لأي مشروع إتاحة العديد من الخيارات لعملائه. والتنوع في إنتاج المنتجات عن طريق التصنيع التقليدي أمرٌ مكلف، وحتى ما يمكن النظر إليه كدفعات صغيرة بالنسبة إلى أي مصنع سيكون كبيرًا جدًّا لهذا النوع من اختبار السوق المتكرر الذي لا يتوقف.

تخيَّل أنك أنشأت لتوِّك شركة ناشئة صغيرة لبيع برنامج، لكنك غير متأكد من المبلغ الذي يمكن أن يدفعه عملاؤك مقابل الحصول على منتجك أو السمات التي يريدون الحصول عليها. يقول رايس إن أي شركة ناشئة تتيح منتجها بأشكال مختلفة وبأسعار مختلفة لعملاء مختلفين؛ لذا يجب عليها جمع البيانات وتعديل المتغيرات والمحاولة مرة أخرى. والأنماط الحاضرة في البيانات التي جُمعت يجب أن تكشف أفضل سمات وأسعار للمنتج.

وكما يبدو أنه الحال دائمًا مع المنتجات الرقمية، فإن هذا النوع من التجريب الديناميكي أسهل وأقل تكلفة، كما تصبح البيانات الخاصة بتفضيلات المستخدم وعمليات شرائهم متاحة بنحو أسرع. أما بالنسبة إلى المنتجات المادية، فإن اتباع أسلوب متكرر وفوري لاختبار متغيرات المنتجات يكون أصعب في تنفيذه، وتصبح بيانات المستخدم أكثر صعوبة في جمعها.

كيف يمكن تطبيق مبادئ كتاب رايس على المنتجات الملموسة؟ تخيَّل أن شركتك الناشئة تبيع أغطية واقية للهواتف المحمولة، إذا أردت مقارنة غطاء ذي نجمة محفورة على جانبه الخلفي بآخر أكثر بساطة، فيمكنك عرض كلٍّ منهما للبيع لترى أيهما كان

الإقبال عليه أكبر؛ لكن في الواقع يجب عليك صنع الاثنين ودفع تكلفة صنع قالبَي حقن مختلفَين.

بمساعدة طابعة ثلاثية الأبعاد، يمكنك إنتاج آلاف الأغطية الواقية المتنوعة بنفس سهولة إنتاج ألف غطاء متطابق، ويمكنك إتاحة تنوع كبير من الأغطية على موقعك الشخصي لترى أيها يجتذب أكبر قدر من المبيعات.

ربما لن تبيع أنواعًا معينة من الأغطية الواقية، أو ربما تبيع القليل من أنواع أخرى. في النهاية ستعلم أي غطاء حقق قبولًا كبيرًا لدى العملاء، وهو الغطاء الذي سيبرر الاستثمار الذي ستدفعه في إنتاجه.

وبعد مرور شهر، يمكنك تكرار هذه التجرِبة مع استبعاد الأغطية التي لم تحقِّق أي مبيعات وصنع أشكال جديدة من التي بِيع منها، ومثل نظرية داروين للتطور والانتقاء الطبيعي، يمكنك تطوير منتجك الملموس من خلال عملية إنتاج مستمرة.

مثل هذه العملية ممكنة فقط من خلال اقتصادات الحجم التي تتيحها الطابعات الثلاثية الأبعاد، من خلال تقليل وقت الإنتاج والاستثمار المبدئي. هذه العملية هي طريقة جديدة للعثور بنحو سريع على ما هو مناسب وما هو غير مناسب؛ وعلى ما هو رائج وما هو كاسد، وما التحسينات التي هي في حاجة لتنفيذها وما تلك التي يمكن التغاضي عنها. الأمر بالكامل يتعلق بالتكيف السريع.

التنوع يمكن أن يكون سلاحًا ذا حدَّين، يحتاج أن يُستخدم بحذر. وكما تفتح الطابعات الثلاثية الأبعاد الباب لتقديم تنوع أكبر من المنتجات الملموسة، ربما نبدأ في تجرِبة تنوع زائد عن الحد لها. كما أن توفير عدد مبالغ فيه من الخيارات للعملاء يمكنه خلق حمل زائد عليهم عند الانتقاء.

## (٣-٤) الجنس والترفيه

إن إنتاج المنتجات المخصصة بأعداد صغيرة والتي تُباع بأعلى الأسعار أمرٌ مثالي لصناعة الجنس. إن الجنس والأفلام الإباحية دفعا الإنترنت للنمو في مراحلها الأولى. في الحقيقة، فإن بعض الناس يزعمون بأن أحد أكبر الدوافع وراء التطور السريع لتقنية الوسائط المتدفقة (ومسجل الفيديو من قبلها) هو توفير تجرِبة أفضل لجمهور الأفلام الإباحية. وصناعة ألعاب الفيديو تُعتبر عملاقًا اقتصاديًّا آخر. البعض يزعم كذلك أن تقنيات الألعاب هي الدافع الرئيسي وراءَ تطوير تقنيات العرض الرسومي.

ربما يشعر الناس بآثار الطباعة الثلاثية الأبعاد في صناعتَي الجنس وألعاب الفيديو. لكن لا يرغب الناس في الاعتراف بهذا علانية، لكن عادة بعدما أُنهي حديثي، يخبرني أحدهم أنه عثر على لعبة جنسية متروكة وراء الطابعة الثلاثية الأبعاد الخاصة بالشركة التي يعمل فيها، أو يحكي عن المرة التي اكتشف فيها سبب نفاد مادة خام متمثلة في نوع معين من البوليمر، وهو أن موظفًا في الشركة كان يطبع تماثيل صغيرة لأغراض جنسية، بعد ساعات العمل وذهاب الجميع إلى منازلهم.

أينما ظهرت حاجة بشرية شديدة، يمكن جني المال من ورائها؛ فيمكن صنع نموذج عمل بسهولة، لكن الشركات الرائدة في الطباعة الثلاثية الأبعاد ما زالت مبتعدة — عن عَمْد — عن سوق الصناعة الجنسية.

سيكون من المثير مشاهدة تأسيس أول متاجر للأدوات الجنسية المطبوعة بنحو ثلاثي الأبعاد، ولن يعرف إبداع الناس أي حدود إذا أتيحت لهم القدرة على صنع ألعاب جديدة وفريدة، وما يتعلق بالأمر من أدوات في ظل خصوصية بيوتهم. أضف إلى هذا تقنيات المسح وبرامج التصميم السهلة والروبوتات، وستصبح الاحتمالات لا نهائية.

## (٣-٥) التمويل المتناهي الصغر للمصانع المتناهية الصغر

القروض المتناهية الصغر، والائتمان المتناهي الصغر، والمعاملات المتناهية الصغر، هي جزء من الاقتصاد المتناهي الصغر الآخذ في التنامي. أصبحت المعاملات المتناهية الصغر ممكنة بفضل تقنيات الاتصالات والتعامل البنكي الإلكتروني اللذين يُتمَّان المعاملات الدولية بنحو سريع. ويمكن جمع العديد من الاستثمارات الصغيرة معًا بنحو أكثر سهولة من القليل من الاستثمارات الكبرى، وفي بعض المناطق، يمكن أن يكون للعديد من الاستثمارات الصغيرة أثر تراكمي أكبر من القليل من الاستثمارات الأكبر المختارة بعناية.

يُفضِّل المقرضون التقليديون غالبًا الاستثمار مع مقترضين أصحاب سجل طويل ومستقر من الأداء والتاريخ الائتماني. مع ذلك، فإن بعض أكثر رواد الأعمال والمخترعين والصناع موهبة غالبًا ما ينقصهم سجل إيجابي طويل. وربما تملك القروض المتناهية الصغر قدرة كبيرة على تخفيف حدة الفقر.[4]

بعض فئات المجتمع في العديد من المجتمعات حول العالم — مثل النساء والأقليات والفقراء — تقل احتمالية حصولهم على قروض أو استثمارات من أجل تحقيق أي ابتكار على أرض الواقع. لكن توافر القروض المتناهية الصغر بنحو أكثر يسرًا غيَّر هذه الحقيقة؛

فمنذ عام ٢٠٠٩، تسلَّم ما يقرب من ٧٤ مليون شخص قروضًا متناهية الصغر بلغت قيمتها مجتمعة ٣٨ مليار دولار. وكان معدل السداد المسجَّل ما بين ٩٥ و٩٨ بالمائة، وهو أكبر من معدل السداد لبعض البنوك الكبرى أو حتى لبعض الدول.

إن استراتيجية التمويل المتناهي الصغر تُقارن مباشرة بنموذج عمل مستقبلي نُطلق عليه المصانع المتناهية الصغر. يصِف هذا المصطلحُ الحيز المادي الصغير الذي تَشْغَله، وقدرة الإنتاج الصغيرة خاصتها. وعلى الرغم من ذلك، تقوم هذه المصانع على استثمارات متناهية الصغر والتزامٍ وقتيٍّ أقل وطبيعة لا مركزية شاملة لعملياتها. وهذه المصانع يمكن أن يكون لها نفس الأثر الاقتصادي الإيجابي الذي للقروض المتناهية الصغر؛ مما يغير المجتمعات ذات الدخول القليلة للأفضل، ويدعم القطاعات المحرومة من الحقوق في المجتمع.

ستساعد الاتجاهات الاجتماعية ذات الصلة هذه المصانع المتناهية الصغر في النمو، كما ستساعد نماذج الأعمال الجماعية مفتوحة المصادر هذه المصانع في الحصول على الخبرة والأدوات المطلوبة، وسيساعدها التعهيد الجماعي الإلكتروني في استكشاف أفكار جديدة، وسيسمح التمويل الجماعي لها بجمع المال اللازم لتمويل الأفكار الجديدة.

في المستقبل، لن تقدِر الدول المتقدمة اقتصاديًّا على إقامة معظم اقتصاداتها على الأرباح التي يجلبها التصنيع الواسع النطاق، وسيستمر نقل الوظائف التصنيعية ذات الأجور المنخفضة وإنتاج السلع ذات هوامش الربح الضئيلة لدول تمتلك أيادي عاملة رخيصة. وستتيح تقنيات الطباعة الثلاثية الأبعاد للشركات بناء نماذج عمل جديدة، وصنع بيئة اقتصادية مربحة في اقتصاد المستقبل. وللبقاء في السوق، يجب على الشركات الترقي في سلسلة القيمة بصنع وبيع منتجات وخدمات تدرُّ هامش ربح كبيرًا وتتيح للمستهلكين تجرِبةً شخصية فارقة.

الفصل الخامس

# الطباعة في طبقات

هذا الفصل موجَّه لمحبي التكنولوجيا، ولمن يريدون التعمق في الأسرار الميكانيكية للطباعة الثلاثية الأبعاد. خلافًا لذلك، فإن الوصف المختصر لتقنية هذه الطباعة الذي ذكرناه بالفعل هو كل ما تحتاج إليه للاستمتاع بما تبقى من هذا الكتاب؛ لذا يمكنك تجاوز هذا الفصل إذا أحببت.

الاسم الاصطلاحي الرسمي للطباعة الثلاثية الأبعاد — وهو التصنيع بالإضافة — هو في الواقع اسم وصفي بنحو كبير لطريقة العمل الخاصة بالطابعات الثلاثية الأبعاد. تشير كلمة «بالإضافة» إلى الطريقة التي تصنع بها الطباعةُ الثلاثية الأبعاد الأشياءَ، سواء بترسيب أو دمج المواد الخام في طبقات لصنع جسم صلب ثلاثي الأبعاد. تشير كلمة «التصنيع» إلى حقيقة أن الطابعات الثلاثية الأبعاد تصنع هذه الطبقات طبقًا لنوعٍ ما من العمليات المنهجية القابلة للتكرار والتوقع.

يمكن لأي طابعة ثلاثية الأبعاد أن تكون صغيرة بما يكفي لتلائم حقيبة المشتريات أو تكون بحجم سيارة ميني فان صغيرة، ويمكن للطابعات أن تتراوح تكلفتها من بضع مِئات من الدولارات إلى نصف مليون دولار. والسمة التي تجمع بينها جميعًا هي أنها تتَّبع التعليمات من الكمبيوتر لوضع المواد الخام في طبقات لصنع جسم ثلاثي الأبعاد.

## (١) الطبيعة الحقيقية لعملية التصنيع

عملية الطباعة الثلاثية الأبعاد في طبيعتها عملية تصنيع وليست طباعة. هذا ما أثار اهتمامنا عندما سمعنا بأن شركة عالمية مثل إيه بي سي إيمدجنج أضافت الطباعة الثلاثية الأبعاد للخدمات التي تقدمها. ولمعرفة المزيد، تواصلنا مع جون تي لي مدير

النمذجة الثلاثية الأبعاد وخدمات صنع النماذج الأولية السريعة في الشركة. وافق جون على اصطحابي في جولة تعريفية بعملية الطباعة الثلاثية الأبعاد في مقر الشركة في واشنطن العاصمة.

قال لي جون: «دخلتْ إيه بي سي مجالَ الطباعة الثلاثية الأبعاد بِناءً على طلب عملائنا.» لسنوات، كانت الشركة تصنع مخططات ورقية ومنتجات مطبوعة أخرى، أما الآن، فإن العملاء يُفضِّلون الأجسام الثلاثية الأبعاد. وأضاف جون: «نصنع نماذج معمارية ونماذج أولية للمنتجات لشركات الهندسة والتصميم المعماري، ويُفضِّل عملاؤنا امتلاك جسم ملموس يمكنهم عرضه على عملائهم وتتناقله الأيدي.»

تعمل شركة إيه بي سي في السوق منذ عام ١٩٨٢، ومنذ حوالي خمس سنوات، عينت الشركة جون لإدارة مشروعهم المتنامي للنمذجة الثلاثية الأبعاد وصنع النماذج الأولية السريعة. درس جون الجيولوجيا والجيوفيزياء في جامعة رايس في تسعينيات القرن العشرين، وتَعرَّف على الطباعة الثلاثية الأبعاد في بداية مسيرته الوظيفية عندما كان يعمل في شركة تُنتج خرائط جغرافية ثلاثية الأبعاد.

يومض مقر الشركة في واشنطن العاصمة بالفخر والانتباه للتفاصيل، بداية من الموقع الإلكتروني للشركة المنظَّم بعناية، حتى الطاولة اللامعة ذات السطح الزجاجي، والمصمَّمة على الطراز الإسكندنافي في غرفة الاجتماعات الرئيسية. نمت الشركة من ورشة للطباعة في واشنطن إلى ٣٥ مركزًا للطباعة و٥٥٠ موظفًا في العديد من المدن حول العالم. وبعد انتهاء الجولة التقديمية، قادني جون عائدَيْنِ لمنطقة إنتاج الشركة. كانت غرفة الطباعة الأساسية في الشركة تشبه فصلًا ذا حجم مناسب ونكهة صناعية جديدة مثيرة للارتياح. كان موظفو الشركة ذوو الملابس غير الرسمية يديرون العديد من الطابعات الملونة ثنائية الأبعاد التي تُصدر أزيزًا، والعاملة على المستوى الصناعي وذات أَسِرَّة الطباعة الكبيرة.

سألت جون إن كان ينظر إلى الطباعة الثلاثية الأبعاد باعتبارها عملية طباعة أم تصنيع. صمت جون قليلًا ثم قال: «أعتقد أن تسمية «الطباعة الثلاثية الأبعاد» هي في الغالب تسمية تسويقية لأغراض تسويقية، فالطباعة الثلاثية الأبعاد عملية تصنيعية؛ فهي يمكنها أن تكون عملية مادية مثيرة للفوضى والتلوث. إننا نستخدم موادَّ كيماوية، واعتمادًا على ما أقوم به هنا، أرتدي القناع الواقي من الغازات أحيانًا.»

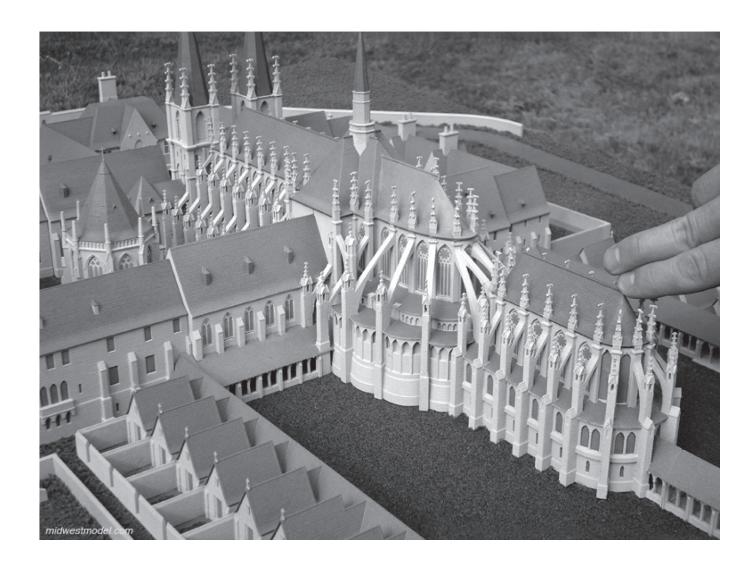
تمتلك شركة إيه بي سي العديد من نماذج الطابعات الثلاثية الأبعاد الصناعية المختلفة والمنتشرة حول العالم في عدة مواقع تابعة للشركة. في مقر الشركة في واشنطن، كان «مصنع» الشركة الصغير الخاص بالطباعة الثلاثية الأبعاد موجودًا في أحد أركان منطقة الإنتاج الرئيسية وراء العديد من مكاتب وحجيرات الموظفين. كانت الغرفةُ الزجاجيةُ الساطعةُ الإضاءة هذه يومًا ما مطبخًا صغيرًا وغرفةً للاستراحة. كانت هناك طابعتان صناعيتان ثلاثيتا الأبعاد ومتوسطتا الحجم تغطيان مساحة كبيرة من أحد الحوائط.

يدير جون خدمات الطباعة في الشركة باستخدام طابعات حديثة باهظة الثمن تصنع أي نموذج ملون ومفصَّل في يوم أو يومين. وتختلف الأُطُر الزمنية للإنتاج اعتمادًا على تعقيد النموذج وهل كان ملف التصميم الخاص بالعميل مُسَوَّدة أولية لم تُجرَّب أم ملفًّا نهائيًّا؛ ومِنْ ثَمَّ يوفر تصميمًا قابلًا للطباعة. إن معظم النماذج الأولية المطبوعة مطبوعة باللون الأبيض. مع ذلك، فإن بعض النماذج والخرائط تُطبع بالألوان.

في غرفة الطباعة بالشركة، تقبع آلة شبيهة بالصندوق بجانب العديد من الطابعات الثلاثية الأبعاد. هذه الآلة تمتلك مقدمة زجاجية وكُمَّين في كل جانب. داخل الآلة ووراء اللوح الزجاجي في المقدمة، يقع مِدفع هوائي قوي. أراني جون كيفية إدخال الذراعين في الكُمَّين على كل جانب من الصندوق وإطلاق الهواء بقوة باستخدام المِدفع الهوائي تجاه جسم مطبوع حديثًا؛ لإزالة ما تبقى من المسحوق عن سطحه. على الحائط المقابل، كانت هناك عدة أحواض معدِنية صغيرة تمتلئ بالفقاعات الصادرة من مذيبات، والتي تُوضع فيها الأجسام المطبوعة لوضع اللمسات النهائية على أسطحها وإذابة أي بقايا للمسحوق.

أراني جون نموذجًا أبيض لامعًا لقصر كبير يليق بإمبراطور. يوجد في مقدمة القصر ثمانية أعمدة تُكون شرفة كبيرة، وفوق سقف القصر، كان هناك درابزين دقيق الصنع يُطوِّق طابقًا مسطحًا تعلوه قبة ذات خطوط نصف قطرية محفورة بعناية، وعلى الجانب الأيمن من القصر، كانت هناك مجموعة من درجات السلم المنحنية التي تقود الزوار إلى الباب الرئيسي.

لم يكن هذا النموذج المعماري الزاخر بالتفاصيل ممكنَ الصنع باستخدام أساليب التصنيع البلاستيكي التقليدية مثل القولبة بالحقن، ولم يكن لأي آلة (أو شخص) أن يمتلك المهارة لتشكيل شكله الدقيق من كتلة من البلاستيك الصلب، كذلك فإن نماذج الورق المقوَّى التقليدية ليست بنفس الجدوى. كما أن الفراغ وراء الأعمدة المكونة للشرفة الأمامية، إذا شُكِّلَ بالطرق التقليدية، كان سيؤدي إلى انهيارها بفعل الضغط.




النموذج المعماري النهائي المطبوع بنحو ثلاثي الأبعاد: دير قديم (الصورة مهداة من شركة ميدويست ستديوز؛ تصوير: إيد واتسون).

كان جون غير منبهر بهذا النموذج المطبوع؛ حيث إنه صَنع ما هو أعقد من هذا بكثير. في هذا الشأن قال جون: «تتيح لك الطباعة الثلاثية الأبعاد صنع بعض الأجزاء والنماذج المذهلة؛ فهي تصنع بعض الأشكال الهندسية التي لا يمكن صنعها بأي طريقة أخرى.»

## (٢) تصنيفان للطابعات

عادةً ما أُخبر الناس أن هناك تصنيفين رئيسيين لتقنيات الطباعة الثلاثية الأبعاد؛ التصنيف الأول يرسب طبقات المادة الخام بعضها فوق بعض لصنع الأشياء، والتصنيف الثاني يدمج المواد الخام لصنع الأشياء.

التصنيف الأول — ولنُسمِّه «طابعات الترسيب الانتقائي» — يرسب المادة الخام في طبقات. هذا النوع من الطابعات يقذف أو يرشُّ أو يكبس المادة الخام، التي على هيئة

سائل أو معجون أو مسحوق، من خلال محقن أو فوهة. والطابعات الثلاثية الأبعاد المستخدمة في المنازل والمكاتب عادةً ما تكون من النوع الذي يعمل بالترسيب؛ بسبب أن وحدات الليزر أو المدافع الحرارية المستخدمة على المستوى الصناعي يمكن أن تكون هشة وخطيرة للغاية.

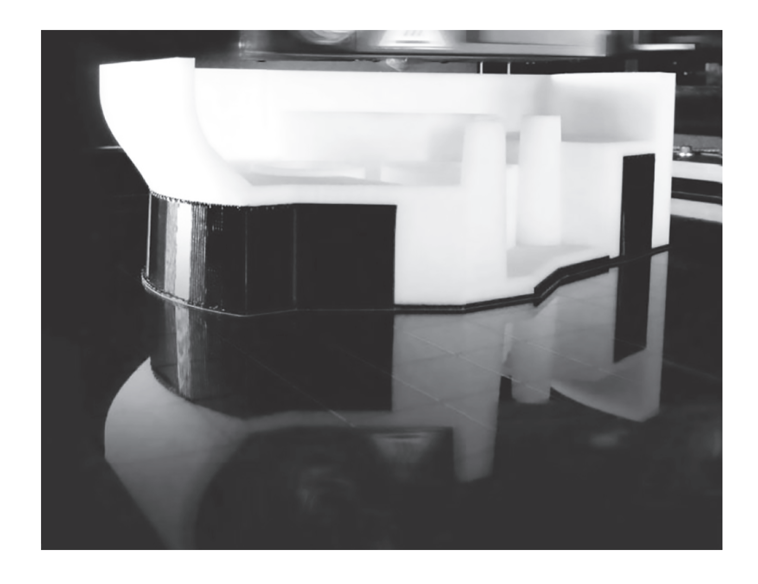
التصنيف الثاني من الطابعات التي تدمج المواد الخام (لكن لا ترسب أو تضع المواد الخام بعضها فوق بعض) يستخدم في المعتاد الليزر أو مادة لاصقة للربط بين المواد الخام. هذا النوع من الطابعات — يسمى «طابعات الدمج الانتقائي» — يستخدم الحرارة أو الضوء لتصليد المسحوق أو البوليمر الضوئي الحساس للضوء. هل تتذكر الزعم الجريء لمندوب مبيعات شركة كيوبيتال الذي أخبرني وزملائي أنه صنع الجسم التوضيحي الذي عرضه علينا باستخدام آلةٍ «طبعتْه» باستخدام الليزر؟

## (٢-١) الطابعات التي تقذف أو تكبس أو ترش

دعونا أولًا نستكشف طابعات الترسيب الانتقائي التي ترسب نوعًا ما من المواد الخام من خلال رأس طباعة أو فوهة. ربما تكون المادة الخام الخاصة بالطباعة هي البلاستيك الطري الذي سيتصلب بمجرد اصطدامه بسرير الطباعة أو عجين بسكويت أو حتى خلايا حية في جل طبي خاص. إذا رأيت طابعة ثلاثية الأبعاد شخصية، في وسائل الإعلام، مثل طابعات شركة ميكربوت، فمن المحتمل أن تكون رأيت هذا النوع من الطابعات.

الاسم التقني الرسمي لأسلوب الطباعة الذي يستخدمه هذا النوع من الطابعات يسمى «النمذجة بالترسيب المنصهر». ابتُكر هذا النوع من الطابعات في ثمانينيات القرن الماضي على يد سكوت كرامب الذي أسس بعد ذلك شركة قائمة على هذه التقنية، وإذا رأيت آلة توصف بأنها طابعة تعمل باستخدام النمذجة بالترسيب المنصهر، فهذا يعني أنها تُخرج مواد خام طرية من خلال رأس الطباعة.

هذا النوع من عمليات الطباعة الثلاثية الأبعاد يبدأ قبل أن يبدأ رأس الطباعة عمله بخطوات عدة. الخطوة الأولى هي العثور على ملف تصميم البرمجي لإعطاء البرنامج الداخلي الخاص بالطابعة الثلاثية الأبعاد (الذي يعرف أيضًا باسم البرنامج الثابت) ما يحتاج إليه من تعليمات للطباعة. بمجرد أن يصبح ملف التصميم جاهزًا، يوصل المستخدم الكمبيوتر المحمول خاصته بالطابعة، ويحفظ ملف التصميم بصيغة ملفات خاصة يمكن لبرنامج الطابعة قراءته والعمل به (سنفسر تفاصيل عملية التحويل هذه لاحقًا).



الجسم الأبيض الموضح ما زال في طور الطباعة. إذا نظرت عن قرب فيمكنك رؤية الطرف المخروطي الأحمر يلامس قمة الجزء الأبيض، وينبثق عنه شريط رفيع من البلاستيك الأبيض. والبلاستيك الداكن هو هيكل دعم مطبوع سيزول لاحقًا (الصورة مهداة من شركة استراتاسيس).

بمجرد قراءة البرنامج الثابت للطباعة للملف المهيأ، يحسب المسار الميكانيكي والحركات الخاصة برأس الطباعة. على سبيل المثال، يحتاج رأس الطباعة لمعرفة أين يجب أن تُرسب فوهة الطباعة الإطار الخارجي لشكل التصميم والكمية اللازمة من المادة الخام التي يجب على رأس الطباعة إخراجها وأين يضعها وما إلى ذلك.

بمجرد إنهاء البرنامج الثابت للطابعة تخطيط هذا التتابع من العمليات، يمكن لعملية الطباعة المادية البدء. تحرك الطابعات التي ترسب المواد الخام في المعتاد رأس الطباعة فوق مجموعة من القضبان الرأسية والأفقية (يسميها المهندسون المسند أو الهيكل المؤقت) التي تدفع رأس الطباعة أينما تحتاج أن تكون. ولترسيب الطبقة الأولى، يخطط رأس الطباعة الإطار الخارجي للحيز الذي سيشغله الجسم الذي سيُطبع. وتمثل الطبقة الأولى، التي تشبه تخطيطًا بقلم رصاص حول الجزء السفلي من قدح قهوة، المخطط

الخارجي لقاعدة الجسم، ثم يستمر رأس الطباعة في التحرك ذهابًا وعودة؛ لملء محيط الشكل مثل طفل يملأ شكلًا في كتاب للتلوين.

بعد وضع أول طبقة في الحيز الذي يشغله الجسم، يرتفع رأس الطباعة بنحو طفيف ويعود للعمل لوضع الطبقة الثانية، وتستمر الطابعة في تكرار هذه العملية حيث تضع بتأنٍّ قطاعًا عرضيًّا تلو الآخر من الجسم بعضه فوق بعض، كما هو موضح في ملف التصميم، وهي عملية يمكن أن تستمر لساعات بل لأيام.

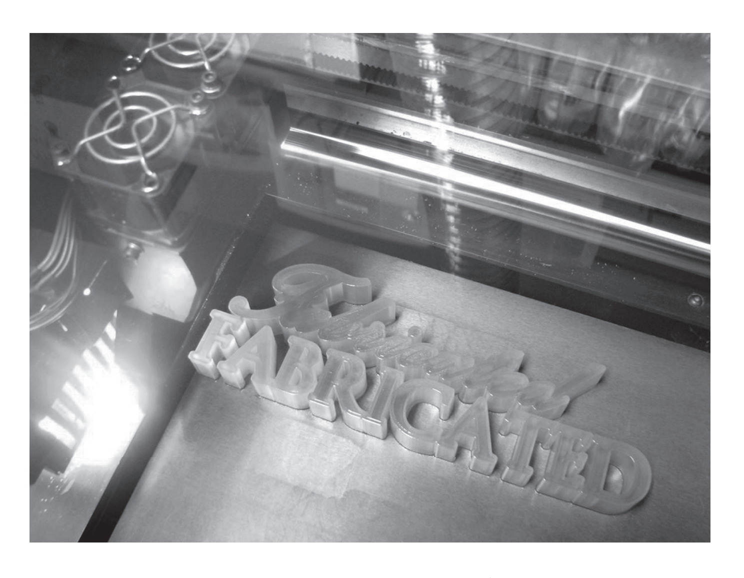
الأمر الجيد المتعلق بهذا النوع من الطباعة الثلاثية الأبعاد هو أن تقنية الطباعة يمكن تبسيطها لنُسخ منخفضة التقنية نسبيًّا وقليلة التكلفة، ويمكنها استخدام نطاق عريض من المواد الخام؛ فأي مادة خام يمكن إخراجها من الفوهة يمكن طباعتها بنحو ثلاثي الأبعاد. سكر التزيين والجبن وعجين البسكويت هي مواد خام شهيرة لمحبي الطباعة والطعام. إحدى مواد الطباعة التي بدأ استخدامها حديثًا هي «الحبر الحي» وهو مزيج من الخلايا الحية الموضوعة في جل طبي خاص التي يستخدمها الباحثون في مجال الطب من أجل أبحاث الطباعة الحيوية الثلاثية الأبعاد.

على الرغم من أن شركات التصنيع والتصميم تستخدم طابعات كبيرة وباهظة الثمن من هذا النوع، فإن طابعات الترسيب الانتقائي مثالية للاستخدام المنزلي أو المدرسي أو المكتبي. وحتى الطابعات رخيصة الثمن من هذا النوع تعمل بصوت منخفض، كما أن استخدامها لرأس طباعة منخفض الحرارة بنحو نسبي يجعلها أكثر أمانًا في تشغيلها من الطابعات التي تستخدم أشعة الليزر عالية القدرة.

أحد أكبر الجوانب السلبية لطابعات الترسيب الانتقائي هو أنه يمكنها طباعة الأجسام باستخدام المواد الخام التي يمكن إخراجها من رأس الطباعة فقط؛ ولذا يجب تشكيل الزجاج أو المعدِن المنصهر، على سبيل المثال، في ظروف مختلفة. ومعظم الطابعات التي تعمل بالترسيب، المتاحة في السوق اليوم، تحافظ على بساطة عملية التصنيع باستخدام نوع خاص من البلاستيك يُصنع مخصصًا لها. ويُباع بلاستيك الطباعة الثلاثية الأبعاد على هيئة جدائل ملفوفة تشبه مكرونة الإسباجيتي التي توضع نهاياتها مباشرةً في الطابعة حيث يُذاب البلاستيك ويُخرج من خلال رأس الطباعة.

## الطباعة بنفث البوليمر

تُعتبر الطابعات التي تنفث البوليمر أحدث أنواع الطابعات العاملة بالترسيب، وقد طورتها عام ٢٠٠٠ شركة إسرائيلية تسمى أوبجيت جيومتريز (والتي اندمجت مع




طابعة تنفث البوليمر تُصنِّع واحدًا من التصميمات المرشحة لغلاف هذا الكتاب.

شركة استراتاسيس عام ٢٠١٢). تقتبس الطابعات التي تنفث البوليمر التقنيات من كلا النوعين الرئيسيين للطابعات الثلاثية الأبعاد، بجمعها بين رأس الطباعة الذي يرش البوليمر الضوئي السائل على هيئة طبقات رفيعة للغاية، وتصليدها لهذا البوليمر من خلال مصباح للأشعة فوق البنفسَجية قوي.

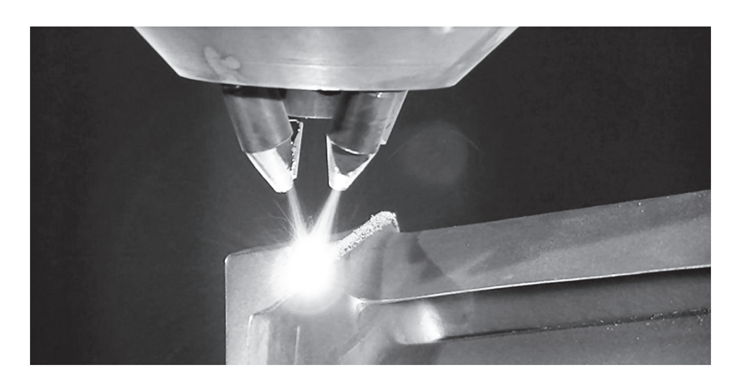
إن فائدة استخدام هذا النوع من الطابعات هي أن رش القطيرات يُعتبر طريقة سريعة ودقيقة لتصنيع طبقات رفيعة للغاية يصل سمكها إلى ١٦ ميكرونًا، وللتوضيح فإن قطر كرة الدم الحمراء يصل إلى ١٠ ميكرونات، ودقة الطابعات التي تنفث البوليمر تجعلها مثالية لاستخدامها في التطبيقات الصناعية أو الطبية؛ حيث يمكن أن تُمثِّل الأشكال «عالية الدقة» وسرعة الطباعة عاملين مهمين للغاية في عملية الطباعة. ويمكن لتلك الطابعات استخدام عدة رءوس طباعة في نفس الوقت حيث يمكنها الطباعة باستخدام العديد من المواد الخام في عملية طباعة واحدة.

يكمن أحد أكبر عيوب الطباعة باستخدام هذه الطابعات في القيود المتعلقة بالمادة الخام التي تستخدمها، وهو نوع من البلاستيك يسمَّى البوليمر الضوئي. والبوليمر

الضوئي نوع من البلاستيك باهظ الثمن وشديد التخصص يستجيب للأشعة فوق البنفسَجية، ويمكن أن يكون البلاستيك أحد أكثر مواد التصنيع الموجودة صلابة لكن معظم أنواع البوليمر الضوئي هشة وسريعة الانكسار نسبيًّا، وهو ما يحد من نطاق تطبيقاتها.

## التشكيل النهائي بالليزر

أحد أنواع الطباعة بالترسيب الانتقائي هو «التشكيل النهائي بالليزر»، وهو ما يقذف مادة على هيئة مسحوق داخل شعاع ليزر قوي يوجهه بحرص. بعض المسحوق يفلت من الشعاع ويقع جانبًا، لكن الجسيمات المحظوظة التي ترتطم بنقطة بؤرة شعاع الليزر تنصهر وتندمج فورًا في سطح الجزء المتنامي. ولهذا، وأثناء مسح نقطة بؤرة الليزر للحدود الخارجية للجسم المطبوع، وإخراج الفوهة للمزيد من المسحوق، فإن الجزء الذي يُطبع ينمو طبقة بطبقة.



معدِن مسحوق يُقذف داخل شعاع ليزر. تنصهر الجسيمات التي ترتطم بنقطة البؤرة وتُكوِّن الجسم المعدِني تدريجيًّا (الصورة مهداة من ريتشارد جريلز من شركة أوبتوميك).

مِيزة هذه العملية هي أنه يمكنها صنع أجسام من مواد خام صلبة مثل التيتانيوم والصلب غير القابل للصدأ. قبل ابتكار عمليات «الطباعة» المعدنية هذه، لم تنظر الصناعات «الكبرى» للطباعة الثلاثية الأبعاد بجدية؛ بسبب أنها كانت تعمل فقط

بالبلاستيك (البوليمر)، وعندما ظهرت عمليات طباعة المعادن مثل التشكيل النهائي بالليزر، أصبحت الصناعات الكبرى مثل صناعات الطائرات والسيارات أكثر اهتمامًا بالطباعة الثلاثية الأبعاد. وتستخدم تقنية التشكيل النهائي بالليزر اليوم لصنع أجسام معقدة من المعادن الصلبة مثل رِيَش التوربينات المصنوعة من التيتانيوم ذات قنوات التبريد الداخلية.

وبما أن أكثر من فوهة واحدة يمكن أن تقذف المسحوق خلال شعاع الليزر في نفس الوقت؛ فيمكن استخدام العديد من المعادن الشائعة في نفس الوقت من أجل «طباعة» سبائك (معادن مختلطة) بنِسب قابلة للضبط، ويمكن أن تتغير النسبة بِناءً على موضع الرأس؛ مما يؤدي إلى صنع سبائك متدرجة.

## التصنيع الرقائقي

وأخيرًا وليس آخرًا، هناك نوع آخر من أنواع الطباعة بالترسيب الانتقائي، وهو التصنيع الرقائقي. لا تستخدم الطابعات المعتمدة على هذا الأسلوب رأس طباعة لتكوين طبقات، بل — كما يشير اسم الأسلوب — تُحوَّل المادة الخام لرقائق أو صفائح رفيعة، ثم تُدمج معًا لتصنع جسمًا واحدًا ثلاثي الأبعاد.

تبدأ عملية التصنيع الرقائقي بملف تصميم، وبدلًا من استخدام رأس طباعة، تقوم سكين أو شعاع ليزر بالعمل. باتباع إرشادات ملف التصميم، تقطع أداة القطع الحدود الخارجية للشكل المطبوع من طبقة رقيقة من الورق أو البلاستيك أو المعدِن. تخيَّل أنك أمسكت بقدح قهوة ووضعته على قطعة من الورق ثم قطعت حدوده الخارجية على الورق لتأخذ شكل قاعدة القدح.

بعد انتهاء أداة القطع من عملية القطع، تزيح الطابعة ما قُطع جانبًا وتضع طبقة رقيقة جديدة من غشاء لاصق لقطع الطبقات التالية. تكوم الطابعة الطبقات المقطوعة من الورق أو البلاستيك أو المعدِن. وعندما ينتهي تقطيع القطاعات العرضية للجسم الذي يُطبع، تُصفح الطابعة وتكبس الطبقات المقطوعة لدمجها معًا في جسم ثلاثي الأبعاد صلب. وبعض طرازات هذا النوع من الطابعات تدمج صفائح مقطوعة من ورق الألومنيوم بذبذبات فوق صوتية قوية تتسبب في حك أي طبقة بالتي تسبقها لتكون معًا طبقات مرصوصة بنحو سميك.

## (٢-٢) الطابعات التي تصهر أو تدمج أو تلصق

العائلة الثانية الكبيرة من الطابعات الثلاثية الأبعاد هي تلك التي تستخدم عملية الدمج الانتقائي لصهر أو دمج المواد الخام في طبقات. استخدم العديد من أوائل الطابعات الثلاثية الأبعاد التِّجارية هذه الطريقة. هناك نوعان من هذه الطريقة، بنحو خاص، يُستخدمان على نطاق واسع: الطباعة الفراغية والتصليد بالليزر.

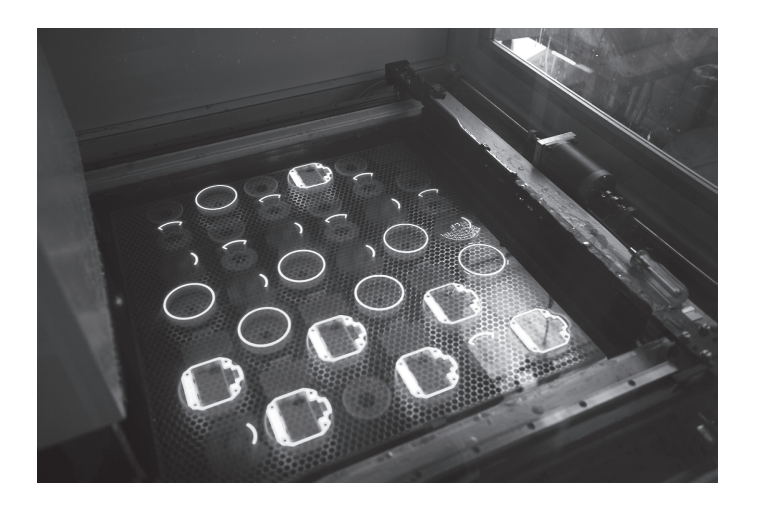
### الطباعة الفراغية

تُعتبر الطباعة الفراغية أو الستيريوليثوجرافي إحدى أولى الطرق التِّجارية للطباعة الثلاثية الأبعاد. تخيَّل وعاءً صغيرًا مليئًا بالبوليمر السائل يقبع داخل طابعة بحجم الثلاجة المنزلية. تمرِّر الطابعة شعاع الليزر فوق سطح من نوع خاص من البلاستيك، وهو البوليمر الضوئي الحساس للأشعة فوق البنفسجية، الذي يتصلب عند التعرض له. وكل مسحة من الليزر تخطط الإطار الخارجي والقطاع العرضي للشكل الذي يُطبع في طبقات متتابعة.

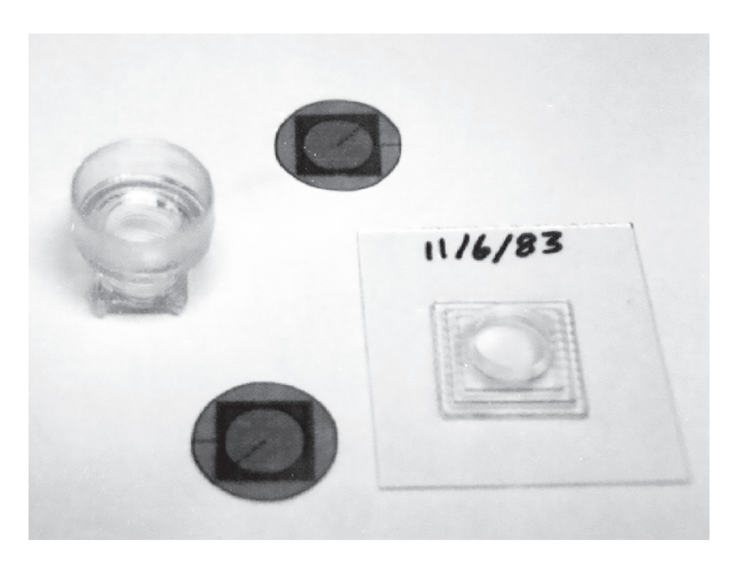
بعد كل مسحة لليزر، تنخفض الطاولة القابلة للتحريك التي يقبع عليها الجزء المطبوع بمقدار ضئيل من المِلِّيمتر. هذا الجزء يسقط قليلًا في السائل ثم يغمر بوليمر ضوئي جديد قمته. وبعض طابعات الطباعة الفراغية تعمل في الاتجاه المعاكس بتوجيه الليزر لأعلى للبوليمر الضوئي ثم رفع (بدلًا من خفض) الجسم المطبوع لتنغمر قاعدته (بدلًا من قمته) في سائل جديد.

بعد الانتهاء من طباعة جسم ثلاثي الأبعاد بهذه الطريقة، ما زال هناك ما يجب القيام به؛ إذ يجب شطف المواد الخام الزائدة، وأحيانًا يحتاج الجسم لصنفرة أسطحه يدويًّا. واعتمادًا على ما يُطبَع، يتم أحيانًا المزيد من المعالجة في «فرن» للأشعة فوق البنفسجية.

الجانب الإيجابي للطباعة الفراغية هو أن الليزر سريع ودقيق، ويمكن لأشعة ليزر متعددة العمل بنحو متوازٍ لتخطيط الأشكال بدقة أعلى مما تقوم به رءوس الطباعة الثلاثية الأبعاد الحالية، والتي تعمل بقذف المواد الخام. ويمكن للطابعات الثلاثية الأبعاد الصناعية اليوم صنع نماذج وأجزاء دقيقة الصنع، بطبقات رفيعة يصل سمكها إلى ١٠ ميكرومترات، وهو ما يقل سمكًا عن قطعة ورق رقيقة. وبينما تستمر جودة وأنواع البوليمر الضوئي الخام في التطور، فإن آلات الطباعة الفراغية يمكنها صنع نطاق أكثر توسعًا من الأجسام بمواد خام متخصصة.



بينما يخطط ليزر الأشعة فوق البنفسَجية شكل القطاعات العرضية المتوالية، فإن الأجزاء الصُّلبة تُخفض ببطء في الخزان (الصورة مهداة من شركة سوليد كونسبتس).




أحد أول النماذج في العالم لعملية الطباعة الثلاثية الأبعاد. ترجع تقنية الطباعة المستخدمة، وهي الطباعة الفراغية، لأوائل ثمانينيات القرن العشرين (الصورة مهداة من تشاك هال).

أحد الجوانب السلبية للطباعة الفراغية هو أن الأبخرة الناتجة من البوليمر الضوئي غير المعالج يمكن أن تسبب التسمم إذا استُنشقَت. كذلك، فإن البوليمر الضوئي ليس قويًّا وشديد التحمل مثل نظرائه من اللدائن الحرارية المستخدمة في التصنيع بالقولبة بالحقن، كما أن تكلفة وتعقيد الإبقاء على آلة تستخدم الليزر يجعل تكلفة الطباعة الفراغية مرتفعة للغاية بالنسبة إلى الاستخدام المنزلي، لكن هناك آلات أقل تكلفة تستخدم ليزر الأشعة فوق البنفسَجية قليل التكلفة من أقراص البلو راي ربما تؤدي إلى نمو هذه السوق، ويمكن لآلات الطباعة الفراغية حاليًّا الطباعة بمادة خام وحيدة فقط في كل مرة.

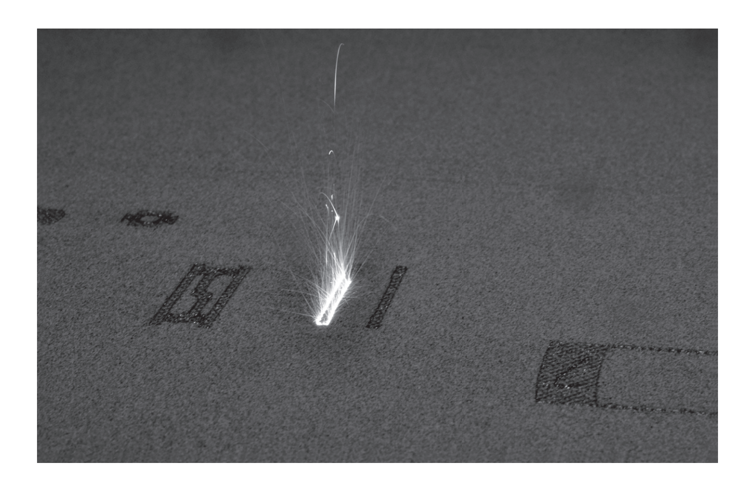
## التصليد الانتقائي بالليزر

ابتكر باحثان من جامعة تكساس، هما كارل ديكارد وجوزيف بيمان تقنية التصليد الانتقائي بالليزر في ثمانينيات القرن العشرين.[1] يتبع التصليد الانتقائي بالليزر أسلوبًا مشابهًا للطباعة الفراغية. لكن بدلًا من استخدام البوليمر الضوئي السائل في وعاء، تستخدم مسحوقًا.

ومثل الطباعة الفراغية، فإن عملية الطباعة بالتصليد الانتقائي لليزر ليست كما يتصور العديد من الناس أنها «عملية طباعة». تمرر هذه الطابعات شعاع ليزر قويًّا على سطح سرير من المسحوق. ينصهر المسحوق حينما يتعرض لشعاع الليزر، ثم تضع أسطوانة دوارة داخل الطابعة طبقة جديدة من المسحوق على الجانب العلوي، وتخفض سرير الطباعة جزءًا ضئيلًا من المِلِّيمتر.

الطباعة باستخدام المسحوق بدلًا من المواد السائلة لها مزايا؛ فالجسم المطبوع من المسحوق تقل احتمالات انهياره خلال عملية الطباعة؛ حيث إن المسحوق غير المنصهر يعمل كداعم ذاتي. في بعض الحالات، يمكن إعادة تدوير بقايا المسحوق غير المستخدمة واستخدامها في عملية طباعة أخرى. والمواد الخام التي على هيئة مسحوق تكون أكثر تنوعًا؛ حيث إن العديد من المواد الخام يمكن الحصول عليها على هيئة مسحوق، بما في ذلك النايلون والصلب والبرونز والتيتانيوم.

الجانب السلبي للتصليد بالليزر هو أنه يصنع أجسامًا مسامِّية الأسطح وليست ملساء، ولا يمكن للطابعات التي تستخدم هذه التقنية حاليًّا طباعة عدة أنواع من المسحوق في وقت واحد، كما أنها ما زالت غير مناسبة للاستخدام في المنازل أو المكاتب؛ وبما أن بعض أنواع المسحوق تميل للانفجار إذا لم يكن التعامل معها بنحو صحيح، لذا تحتاج الطابعات بالتصليد بالليزر لوضعها بغرفة مغلقة بإحكام ومليئة بغاز النيتروجين.



شعاع ليزر يصهر ويدمج معدِنًا على هيئة مسحوق. ينتهي الحال بالجسم المطبوع مغمورًا تحت مسحوق في نهاية عملية الطباعة (الصورة الإيضاحية مهداة من شركة سوليد كونسبتس).

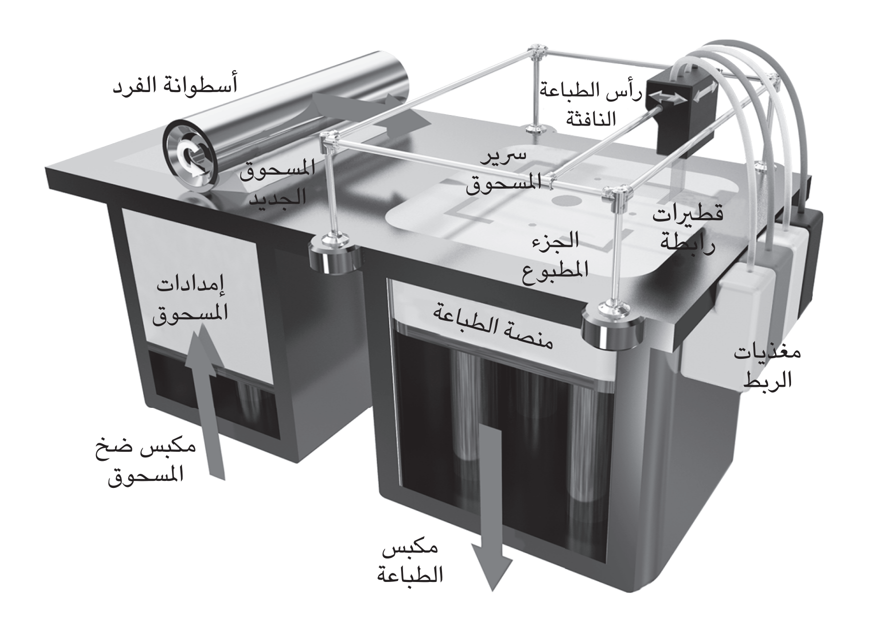
وأخيرًا، فإن الطباعة بالتصليد بالليزر تُصدِر حرارة شديدة، ولا يمكن الإمساك بأي جسم مكتمل الطباعة مباشرةً بعد إخراجه من الطابعة. وبِناءً على حجم وسُمك الطبقات، ربما تحتاج الأجزاء الأكبر إلى أن تُترك لتبرد لفترة تصل إلى يوم.

## الطباعة المجسمة

في عملية الطباعة المجسمة يُخرِج رأس الطباعة مادة لاصقة — أو نوعًا معينًا من الصمغ — لتغطيَ مسحوق المادة الخام. ابتكر هذه التقنية في أواخر ثمانينيات القرن العشرين طالب في معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا، يدعى بول وليامز، بالتعاون مع الأستاذ المشرف عليه إيلاي ساكس.

في ذلك الوقت كانت أنظمة التصنيع بالإضافة التِّجارية تستخدم الليزر، وفي بعض الأحيان مواد سامة للطباعة، وكانت الأنظمة في حجم شاحنة صغيرة. وكانت أولى آلات التصنيع بالإضافة معقدة التشغيل وباهظة الثمن؛ وحيث إن الطباعة المجسمة كانت بديلًا مرحَّبًا به، سجل معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا لاحقًا براءة اختراع التقنية التي تقوم

عليها الطباعة المجسمة، ورخَّصَتْها للعديد من الشركات (حيث أصبحت أساس العديد من الطابعات الثلاثية الأبعاد التِّجارية حول العالم).




يُنفَث الصمغ الملون خلال عملية الطباعة المجسَّمة بالألوان على سرير من مسحوق قائم على النشا ثم تُبسط طبقة جديدة من المسحوق ثم تتكرر العملية (الصورة مهداة من ديفيد مكارثي).

كان سر نجاح الطباعة المجسمة يكمن في بساطتها. كانت رؤية بول وليامز لها رؤية جريئة وخاصة؛ بالنظر إلى أحدث التقنيات آنذاك. كتب بول في أطروحة الماجستير خاصته قائلًا: «هدف التصنيع المكتبي هو صنع أجزاء بضغطة زر، من دون الاحتياج إلى القيام بأي شيء آخر.»[2] تخيلَ وليامز الطباعة المجسمة كنظام تصنيع مكتبي يتميز بالسرعة والدقة وانخفاض التكلفة وسهولة الاستخدام.

اليوم، حققت الطباعة المجسمة رؤية صانعها وأصبحت طريقة شهيرة ومنخفضة التكاليف للطباعة الثلاثية الأبعاد، وبما أن الطابعات التي تعمل بالطباعة المجسمة تُكوِّن الطبقات عن طريق ضخ الصمغ فوق المواد الخام، فإن هذه الآلات لا تستخدم الليزر،

ويمكن أن تستخدم نطاقًا عريضًا من أنواع المواد الخام. ولا يحتاج هذا النوع من الطابعات لدعم مكونات عالية القدرة؛ ولهذا فإنها موفرة للطاقة في تشغيلها. لكن الجانب السلبي لها يكمن في أن الأجسام المطبوعة بها تميل لأن تكون لها أسطح خشنة؛ وذلك بسبب صعوبة صنع طبقات شديدة الرفع دون شعاع ليزر.

إحدى كبرى مميزات الطباعة المجسمة هي قدرتها على استخدام الألوان في الطباعة؛ فعندما يُرسب الصمغ، يمكن أيضًا نفث بضع قطيرات إضافية من الحبر الملون مما يسمح بتصنيع نماذج ملونة ثلاثية الأبعاد. ويمكن كذلك استخدام الكثير من أنواع المواد الخام التي على هيئة مسحوق، والتي تتنوع ما بين ما يشبه النشا، وهو ما يُنتج أجسامًا بقوام يشبه الحجر الرملي إلى مسحوق الصَّلصال الذي يحتاج إلى وضعه داخل أحد الأفران ليصبح صُلبًا. استخدم البعض في الطباعة المجسمة مسحوق الزجاج والعظام المطحونة والإطارات المقطَّعة وحتى نُشارة الخشب. وبعض الطابعات تستخدم مسحوق معادن مثل البرونز، ثم يحتاج البرونز المُغرَّى إلى وضعه في فرن ليصبح صُلبًا.

## (٣) إعداد ملفات التصميم

تبدأ عملية الطباعة باستخدام ملف تصميم. ومثل الجبل الجليدي الذي يقبع الجزء الأكبر منه تحت الماء، فإن عملية الطباعة تحتاج إلى قدر ضخم من الإعداد يتضمن إعداد ملف التصميم وتحضير الطابعة. خلال زيارتي لشركة إيه بي سي إيمدجنج، أخبرني جون أن أحد أكبر التحديات (الذي لا يُلاحَظ كثيرًا) هو مساعدة عملائه في حفظ ملفات التصميم خاصتهم بصيغة مناسبة.

يجب أن يكون ملف التصميم متوافقًا مع البرنامج الداخلي في الطابعة الثلاثية الأبعاد. يرشد هذا البرنامج (أو ما يعرف باسم البرنامج الثابت) مكونات الطابعة الميكانيكية إلى ما يجب أن تقوم به، ولا يكون دائمًا إعدادُ ملف تصميمٍ مكتملٍ لطباعته على نحو ثلاثي الأبعاد عمليةً بسيطة.

في شركة إيه بي سي إيمدجنج، تبدأ عملية الطباعة الثلاثية الأبعاد عندما يسلِّم عملاء الشركة — وأغلبهم من المهندسين والمهندسين المعماريين — ملفات التصميم لجون. تميل معظم المهن لتفضيل نوع معين من برامج التصميم. على سبيل المثال، العديد من المهندسين المعماريين يستخدمون برنامج جوجل سكتش آب. هذا البرنامج مجاني، ويُعتبر أداة تصميم سهلة الاستخدام للمعلمين والمهندسين المعماريين والمصممين المبتدئين. ويميل

المهندسون لصنع ملفات التصميم باستخدام برنامج متقدم وتِجاري للنمذجة الصُّلبة. ويعمل جون مع الجغرافيين أو الجراحين أو صناع الخرائط بنحو متكرر وتأتي بياناتهم من ماسح ضوئي أو مستشعر عن بُعد أو تصوير طبي تشخيصي.

هناك تحدٍّ متكرر في عملية الطباعة الثلاثية الأبعاد، وهو كيفية التعامل مع مسألة أن معظم برامج التصميم صُنعت من دون وضع الطباعة الثلاثية الأبعاد في الاعتبار. يأتي ملف التصميم بمجموعة مربكة من الصيغ المختلفة للملفات، كلٌّ له تحدياته وخصائصه. وخلال زيارتي لإيه بي سي إيمدجنج، أخبرني جون: «في عالم الطباعة ثنائية الأبعاد، إذا كان لديك مستند مُنجز بنحو سيئ أو غير جذاب، ونقرت على زر الطباعة، فما زلت ستحصل في النهاية — بنحوٍ ما — على مستند مطبوع، حتى لو لم يكن ما تريد حقًّا.»

استمر جون قائلًا: «أما في الطباعة الثلاثية الأبعاد، فالأمر لا يسير وفق قاعدة «المُدخلات الرديئة تؤدي إلى مخرجات رديئة»؛ فإذا كانت المُدخلات رديئة فلن يخرج أي شيء؛ ففي عالم الطباعة الثلاثية الأبعاد، إذا حصلت على ملف تصميم سيئ الإعداد، سينتهي بك الحال بلا شيء، أو الأسوأ من ذلك، سينتهي بك الحال بتبديد مواد خام باهظة التكلفة.»

يحتاج معظم ملفات التصميم، وخاصة تلك المصممة لأجسام معقدة، إلى بعض التعديل المُتقَن. قال جون في هذا الشأن: «على الرغم من أن الناس تتحدث كثيرًا عن جودة برامج التصميم، فما يهم حقًّا هو مهارة صانع ملف التصميم؛ فيمكن لملف التصميم السيئ أن يبطئ من عملية الطباعة؛ حيث إنني أحتاج إلى إعادة ضبطه وإصلاحه من أجلهم.»

بعد تقديم العملاء لملفات التصميم، فإن الخطوة التالية لجون هي تحويل الملف إلى صيغة خاصة بالطباعة الثلاثية الأبعاد تسمى «إس تي إل». هذه الصيغة صيغة ملفات معيارية يرجع تاريخها إلى عقود حيث صنعها تشاك هال مخترع تقنية الطباعة الفراغية ومؤسس شركة ثري دي سيستمز. هذه الصيغة مشابهة قليلًا لصيغة البوست سكريبت التي تحوِّل مستندات الكمبيوتر إلى شيء تستطيع طابعات الورق ثنائية الأبعاد قراءته والتعامل معه.

قال جون: «جزء كبير من عملي هو ضبط الجودة للتأكد من أن ملف إس تي إل سيقوم بما هو مفترض أن يقوم به.» تعود صيغة الملفات الموجودة اليوم لعصرٍ كان الناس يحتاجون فيه إلى أقل القليل من طابعاتهم الثلاثية الأبعاد. ووظيفة هذه الملفات

مشهد الطباعة الثلاثية الأبعاد هو نظام بيئي معقد مكون من العديد من المنتجات والأدوات والتطبيقات (المفتوحة المصدر) التي تضم البرمجيات والأجهزة والخدمات، ويتراوح مستخدمها ما بين المستهلك العادي إلى المستهلك الصناعي (مصفوفة ترانفام (إصدار ٦، ١١ / ٢ / ٢٠١٢)، مهداة من توان ترانفام: tuan@tranpham.com | @ttranpham | http://www.linkedin.com/in/ttranpham).

ليست وظيفة سهلة. وتلك الصيغة كان لها تاريخ طويل ومميز، لكنه ببساطة لا يستطيع مجاراة التقدم الجاري في تقنيات الطباعة وبرامج التصميم.

يكمن التحدي في حقيقة أن ملف إس تي إل يجب بطريقةٍ ما أن ينقل تعقيدات التصميم والتفاصيل المتشابكة التي ربما تكون مباشرة في شكلها الرقمي لكن يصعب توصيلها لرأس الطابعة الثلاثية الأبعاد. على سبيل المثال، تطورت برامج التصميم في عصر آلات التصنيع التي تقطع الأشياء بدلًا من صنعها من طبقات؛ ولهذا — وبالنظر إلى تاريخ برامج التصميم الهندسية الصناعي — فإنها ما تزال تتعلم كيف تقوم بعمليات إضافة بدلًا من عمليات طرح.

بعد تحويل ملف التصميم لصيغة إس تي إل، فإن تلك الصيغة «تغلف» «الشكل» الرقمي للجسم المصمَّم داخلَ سطح افتراضي يسمَّى الشبكة، وهو مصنوع من آلاف

(وفي بعض الحالات ملايين) المضلعات المتشابكة. كل مضلع متشابك (كثيرًا ما تُستخدم المثلثات) من المضلعات التي تكوِّن سطح الشبكة يحمل معلومات تخص شكل الجسم. في أمر محير بعض الشيء لغير المهندسين، أثناء تحويل ملف التصميم، يتضمن أي شيء يسمَّى سطحًا أي جزء يتعرض للهواء من الجسم المصمم. على سبيل المثال، فإن أيًّا من أسطح الجسم يمكن أن يكون سطحًا خارجيًّا للجسم أو داخل تجويفه الداخلي.

عندما تنتهي عملية التحويل لصيغة إس تي إل، فإن السطح الافتراضي لملف إس تي إل المغلف يجب أن يكون محكمًا تمامًا، ويشبه بنحوٍ ما عملية تغليف جسم مادي بنوع من مادة محكمة مقاومة للماء. إن هذا الملف هو ملف يغطي ويقرأ سطحه الشبكي منحنيات أسطح الجسم المُصمم وتجاويفه الداخلية بنحو دقيق وكامل. ومثل أي ثقب أو فجوة في أي حذاء شمواه محكم الإغلاق ومضاد للمياه، فإن أي فجوة في السطح الشبكي لملف إس تي إل يمكن أن تسبب مشكلات لاحقًا.

بمجرد أن يصبح ملف إس تي إل محكم الصنع وجاهزًا للاستخدام، فإن الجسر الرابط بين التصميم بمساعدة الكمبيوتر والتصنيع بمساعدة الكمبيوتر يكون قد اكتمل تقريبًا. وبعد تغليف الجسم المراد طباعته بنحو ثلاثي الأبعاد بسطح شبكي بالشكل الملائم، يجب إعداده للمرحلة الأخيرة؛ عملية التصنيع بالطبقات. في هذه المرحلة، يقوم ملف إس تي إل بآخر عمل له؛ يقرأ البرنامج الثابت للطابعة الملف ثم «يقطع» التصميم الرقمي المغلف بشبكة لطبقات افتراضية رقيقة ستقابل الطبقات الفعلية الرقيقة التي سرعان ما ستُطبع بنحو ثلاثي الأبعاد.

تُمثِّل كل طبقة افتراضية من ملف إس تي إل قطاعًا عرضيًّا لما سيصبح جسمًا نهائيًّا مطبوعًا. هل تتذكرون الإطار الخارجي التخطيطي لقاعدة قدح القهوة؟ هذا الإطار الخارجي سيساوي «طبقة» واحدة في الملف، وسيشكل طبقة مفردة مطبوعة بنحو ثلاثي الأبعاد. وبعد تخطيط المحيط الخارجي، ستحتاج الطابعة للقيام بمسح مجالي ذهابًا وعودة؛ لملء داخل المحيط، تمامًا مثل تلوين الأشكال في كتب التلوين.

بعض الطابعات الثلاثية الأبعاد تمتلك أداة تصوُّر مدمجة تتأكد من تحويل ملف التصميم بمساعدة الكمبيوتر إلى ملف بصيغة إس تي إل. في المستقبل، سيعمل برنامج ذكي على التأكد من أن ملف التصميم يمكنه طباعة ما كان يريده مصممه. في الوقت الحالي، يرشد خبراء مثل جون كل أنواع ملفات التصميم منذ بداية تجسيدها رقميًّا؛ وحتى تصبح نموذجًا جذابًا متينًا مطبوعًا بنحو ثلاثي الأبعاد. قال جون في هذا الإطار: «بمجرد أن يصبح ملف التصميم جاهزًا، فقد انقضى أصعب ما في الأمر.»

إذا كان البشر يقومون بكل شيء حتى الآن، فإنه في هذه المرحلة، بمجرد أن يصبح ملف التصميم جاهزًا، تعمل الطابعة من تلقاء نفسها؛ ففي أعماق الطابعة تُملي أدواتُ التحكم بالغة الصغر والمستشعرات — الشبيهة ببرامج الطابعة في طابعات الورق — على الطابعة ما عليها القيام به للتأكد من أن كل شيء يسير كما ينبغي. أخبرني جون قائلًا: «بعد النقر على زر الطباعة، يمكن للطابعات العمل من دون إشراف طوال الليل.»




الجسم المطبوع بعد إخراجه من سرير الطباعة المليء بالمسحوق وتنظيفه (الصورة مهداة من شركة ثري دي سيستمز).

## (٣-١) طباعة هياكل الدعم والمعالجة البَعدية

تنتهي عملية الطباعة في شركة إيه بي سي إيمدجنج بعملية المعالجة البَعدية. عندما تنتهي الطباعة، يأتي دور البشر مرة أخرى. معظم الأجسام المطبوعة لا تخرج من عملية التصنيع لامعة ومثالية التشكيل؛ ولذا بعد سحب الجسم المطبوع للتوِّ من الطابعة، يأتي دور بعض التنظيف والإعداد اليدوي، وهو إجراء يسمى «المعالجة البَعدية».

التعامل مع أجسام معقدة التكوين ومطبوعة للتوِّ، مثل أي خطوات أخرى في عملية الطباعة الثلاثية الأبعاد، لها منحنى التعلم خاصتها؛ فيمكن أن تكون الأجزاء المطبوعة

حديثًا هشة عندما تخرج من آلة الطباعة. قال جون: «جزء من منحنى التعلم هو أن تكسر العديد من الأشياء وتحرق الكثير من المواد الخام.»

تساهم نفس القدرات التي تجعل الطباعة الثلاثية الأبعاد طريقة جديدة وقوية لصنع أشكال ونماذج جديدة في زيادة تعقيدات عملية التصميم والتصنيع. وتكون الأجسام التي تمتلك الكثير من الأجزاء الطويلة أو تلك ذات التصميمات الملتفة أو المجوفة بنحو كبير الأكثر صعوبة في طباعتها. تخيَّل الطباعة الثلاثية الأبعاد لجسر بروكلين أو نموذج معماري له سقف مسطح رقيق لكنه عريض.

لطباعة سمات رائعة مثل أجزاء شبكية متداخلة بنحو معقد ودقيق، يجب على المصمم الجيد أن يأخذ في الاعتبار هياكل الدعم. تُطبع المواد الخام لتلك الهياكل جنبًا إلى جنب مع المواد الخام الأساسية، ومثل السقالات المؤقتة في أي مشروع بِناء، فإن هياكل الدعم تساعد في الحفاظ على شكل الجسم أثناء عملية الطباعة الثلاثية الأبعاد. بعض الطابعات تتطلب هياكل دعم، وبعضها يعتمد على المسحوق الخام لتوفير هذا الدعم، لكن بعض المصممين يوفرون هياكل دعم إضافية من أجل المزيد من المرونة. وتُزال مواد الدعم في نهاية عملية الطباعة في مرحلة المعالجة البَعدية.

تعتمد درجة ونوع المعالجة البَعدية على تعقيد تصميم الجسم المطبوع، وأي نوع من راتينج البلاستيك مصنوع منه، ومدى الجودة التي يحتاج إلى أن يبدوَ عليها. وربما تتضمن إزالة المواد الخام الداعمة بعض عمليات الصنفرة اليدوية والغسل والتنعيم. وبعض الأجسام المطبوعة بنحو ثلاثي الأبعاد من الممكن أن تُصنفَر أو تُدهَن أو تُلحَم مع أجسام أخرى؛ اعتمادًا على الغرض منها.

## (٤) المواد الخام

إذا كان التعامل مع ملف التصميم يُعتبر تحديًا فيما يتعلق بالربط بين العالَمَين الرقمي والمادي، فإن التحدي الثاني هو إجبار المواد الخام على التشكل كما يريد المصمم. تتكون المادة الخام في العالم الرقمي من نقط ملونة متناهية الصغر من الضوء وتدفقات سريعة من التعليمات الثنائية، لكن العالم المادي ليس منظمًا وسهل التعامل معه على نحو مماثل.

تعمل الطابعات الثلاثية الأبعاد اليوم في الغالب بالبلاستيك. وعلى الرغم من أن كلمة البلاستيك أصبحت مرادفًا للمواد القليلة التكلفة، فإن بلاستيك الطباعة الثلاثية الأبعاد ليس رخيصًا. في الواقع إن تكلفة مواد الطباعة البلاستيكية تزيد على نحو سريع لتصبح جزءًا مهمًّا من تكلفة تشغيل الطابعات الثلاثية الأبعاد.

إن معظم مصنِّعي الطابعات الثلاثية الأبعاد يعدُّون المواد الخام خاصتهم؛ ففي شركة إيه بي سي إيمدجنج عندما أراني جون دِلاءً مليئة بمسحوق طباعة للأغراض التِّجارية، شبَّه تكلفة بلاستيك الطباعة الثلاثية الأبعاد بنموذج العمل سيئ السمعة المسمى بنموذج «ماكينة الحلاقة والشفرات». قال لي: «الأمر يشبه ما تفعله شركة جيليت، يبيعون ماكينة الحلاقة بثمن زهيد لكن يجب عليك شراء الشفرات التي تناسبها من جيليت فقط.»

وحقيقة أن تقنية الطباعة الثلاثية الأبعاد الصناعية تُحسَّن لتستخدم مواد خام خاصة بمُصنع معين إما تدفع الابتكار إلى الأمام أو تضعفه؛ وذلك بناءً على الطرَف الذي تتحدث إليه. الجانب السلبي لهذا هو أن المستخدمين ينصرفون عن تجرِبة المواد الخام الأرخص بسبب أنهم يخافون من خرق ضمان المُصنِّع. أما الجانب الإيجابي للمواد الخام المملوكة لمُصنِّع معين فهو أن مُصنعي الطباعة الثلاثية الأبعاد يكونون متحمسين للاستثمار في تطوير مواد خام تدر الربح وتمتلك أداءً عالي الجودة مما سيدفع التقنية إلى الأمام.

يومًا ما، ستحتوي مواد الطباعة على أنسجة حية أو قطعًا متناهية الصغر من القدرة الحاسوبية أو ستكون قادرة على التصرف بطرق تتحدى الفهم. لكن اليوم، يجب على معظم الشركات وهواة الطباعة الرضا بالمواد الخام المتاحة المتمثلة في البلاستيك والمعادن والخزف والأطعمة نصف الصلبة القابلة للأكل، وبدرجة أقل الخرسانة والزجاج.

يُعتبر البلاستيك أكثر المواد الخام استخدامًا في الطباعة الثلاثية الأبعاد، ويقسم مهندسو البلاستيك المواد البلاستيكية لصنفين رئيسيين: البلاستيك الحراري والبوليمرات المتصلبة حراريًّا. الفرق بينهما يمكن بسهولة تذكُّره بالتفكير في البيض والجبن؛ فمثل الجبن، ينصهر البلاستيك الحراري بالحرارة ولا يتغير تركيبه الداخلي؛ ومن ثَم يمكن أن ينصهر ويعيد الانصهار مرات عديدة. ومثل البيض، تتصلب البوليمرات المتصلبة حراريًّا عند التعرض للحرارة، ويمكن استخدامها مرة واحدة فقط لأن تركيبها يتغير بالتسخين ولا يمكن صهرها مرة أخرى لسائل يعاد استخدامه.

يستخدم معظم الطابعات الموجهة للمستهلكين (من النوع الذي يرسب المواد الخام من خلال رأس طباعة) نوعًا من البلاستيك الحراري يسمى أكريلونتريل بوتادين ستايرين، وهو نفس النوع المستخدم في مكعبات الليجو. ويستخدم معظم الطابعات الثلاثية الأبعاد التي تعمل بتقنية الطباعة الفراغية بوليمرات متصلبة حراريًّا حساسة للضوء

(البلاستيك الذي يشبه البيض). أما الطابعات التي تستخدم التصليد بالليزر فتستخدم بلاستيكًا حراريًّا مسحوقيًّا (البلاستيك الذي يشبه الجبن).

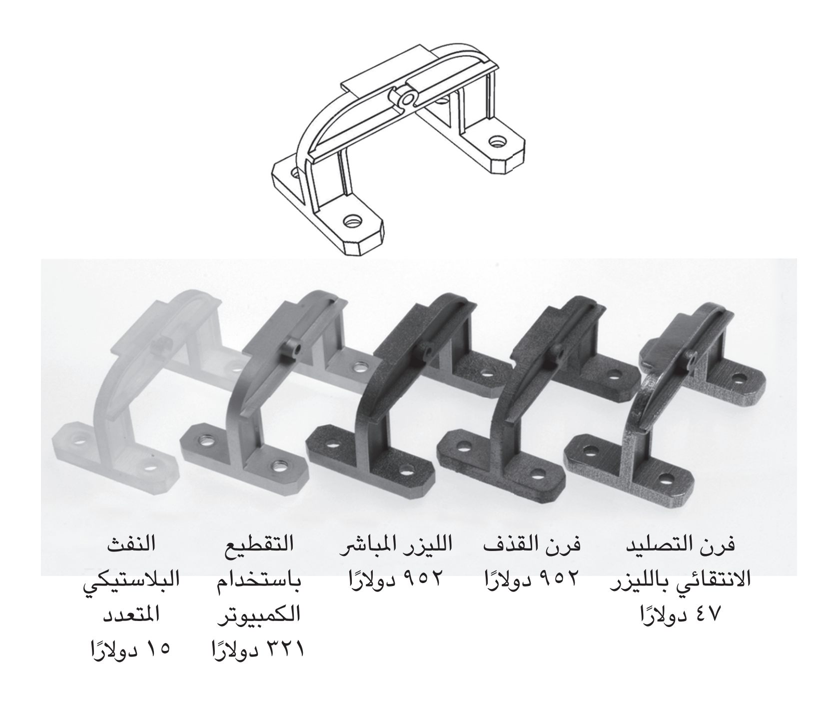
يمكن للطابعات الثلاثية الأبعاد أيضًا استخدام صنف آخر من البلاستيك، وهو البلاستيك المرن المعروف باسم البوليمر المرن. وكما يوحي اسمه فإن هذه المادة الخام التي تشبه الشريط المطاطي تمتلك خواص مرنة متعددة. وبعض أنواع هذه المادة، مثل السيليكون، يمكن ضغطها من خلال محقن ثم تجفيفها بواسطة الهواء. ويمكن طباعة أجسام أخرى طرية ومرنة بصهر البوليمر المرن المتلدن بالحرارة في عملية شبيهة بالمستخدمة في صناعة البلاستيك الصلب.

في الأيام الأولى للطباعة الثلاثية الأبعاد، هاجم المتشككون هذه التقنية الجديدة ورأَوْا أنها ليس لها مكان بين آلات التصنيع «الحقيقي». لماذا؟ لأنه في تلك الأيام لم تقدِر الطابعات الثلاثية الأبعاد على تصنيع الأجزاء المعدِنية. أما الآن فإن الطابعات الثلاثية الأبعاد يمكنها طباعة الصلب والتيتانيوم وحتى التنجستن، وهي معادن صلدة يصعب تشكيلها باستخدام عمليات التصنيع التقليدية.

تُعتبر الأجزاء المعدِنية المطبوعة للآلات تطبيقًا صناعيًّا شهيرًا للطباعة الثلاثية الأبعاد للمعادن. وهناك العديد من الطرق الممكنة لطباعة المعادن. إحدى تلك الطرق تَستخدم عملية متعددة الخطوات يُغطى فيها مسحوق المعدِن في البداية بمادة رابطة بلاستيكية حساسة للحرارة، ثم يُصهران معًا بنحو انتقائي باستخدام الليزر. يلي ذلك إزالة المسحوق غير المنصهر، ثم يُوضع الجسم المعدِني المتبقي في فرن ساخن لتنصهر المادة الرابطة البلاستيكية الصمغية. أما الطرق الأكثر مباشرة لطباعة المعادن فتتضمن استخدام نفاثات لإخراج معدِن مذاب أو لدمج مسحوق معدِني خام باستخدام الليزر مباشرةً.

حتى الآن، لا تقدِر الطابعات الثلاثية الأبعاد للاستخدامات المنزلية على طباعة المعادن بنحو مباشر. لكن هذا آخذ في التغير؛ حيث يمكن للطابعات المتاحة للمستهلكين مثل فاب آت هوم إخراج جِلٍّ مخلوط بمسحوق معدِن. ولتصليد الجل المطبوع لمعدِن، يُوضَع الجسم المطبوع في فرن أو أتون. وغني عن القول أن هذه الخطوة الإضافية من وضعه في الفرن ليست بسيطة إطلاقًا؛ فهي يمكن أن تعرِّض الجسم المطبوع لمخاطر الانكماش والتشقق والاعوجاج.

يمتلك الخزف المطبوع نفس السطح الناعم والخواص الداخلية للخزف المصنوع يدويًّا والمُصلد في الأفران. أحد التطبيقات الواعدة للطباعة الثلاثية الأبعاد هو طباعة العظام الصناعية من الخزف اعتمادًا على الأشعة المقطعية للمريض. يمكن لهذه الأجزاء




المخطط الأولي (الصورة العلوية) والأجزاء المصنَّعة (الصورة السفلية) باستخدام مجموعة من الطرق وتكلفتها الفِعليَّة (الصورة مهداة من روبرت ماكيردي).

أن تُصنع بنحو مخصص، وبما أنها أقل مسامِّية، فيمكن أن تزيد قوتها من ثلاثة إلى خمسة أمثال عن قوة مثيلاتها المصنوعة بالطرق التقليدية.[3] وتقلل العظام الصناعية الخزفية القوية إمكانية انكسار أجزاء متناهية الصغر منها أثناء الجراحة؛ مما يحدُّ بنحو كبير من مخاطر حدوث التهابات ما بعد العملية.

يُعتبر الزجاج، وهو من أكثر المواد الخام استخدامًا في تاريخ الحضارات البشرية، من أكثر المواد التي استغرقت وقتًا ليُقبل الناس على استخدامها في الطباعة الثلاثية الأبعاد. والزجاج مادة صادَّة للماء؛ ولهذا فإنه لا يلتصق جيدًا. كذلك فإن مسحوق الزجاج لا يمكن التنبؤ برد فعله عندما يتعرض للحرارة. لكن طالبَي الدراسات العليا في جامعة واشنطن جرانت مارشيلي ورينوكا بارابهاكار، والأستاذين دوين ستورتي ومارك جانتر،

نجحوا في طباعة أجسام مستخدمين الزجاج المعاد تدويره في معمل بحثي.[4] لكن التطبيق التِّجاري لطباعة الزجاج ما زال محصورًا في الفن والمجوهرات.

يومًا ما، مع تطور التكنولوجيا، ستصبح عملية التصميم والطباعة الثلاثية الأبعاد أتوماتيكية، ولن تكون هناك حاجة لأي خبراء مهرة. وهناك نقاش داخلي في مجتمع الطباعة الثلاثية الأبعاد يُذكرنا بنقاش «تلفزيون في كل بيت» الذي كان سائدًا منذ ما يزيد على نصف قرن مضى. سألتُ جون عن رأيه في هذا خلال زيارتنا لشركة إيه بي سي إيمدجنج.

رد قائلًا: «أعتقد أنه ربما لن تكون هناك طابعة ثلاثية الأبعاد في كلِّ منزل أو مكتب في المستقبل. لكني أرى مستقبلًا آخر يُنزِّل فيه الناس والمهندسون والمعماريون ملفًا مصممًا باستخدام الكمبيوتر للشيء الذي يريدونه، ويطبعونه في ورشة الطباعة الموجودة في حيهم، بدلًا من إرسال طلب لأي مستودع للحصول عليه.» وأضاف جون: «الآن، نحن لا نبعد كثيرًا عن هذا النموذج بالفعل؛ يذهب سُعاتنا طيلة اليوم لتوصيل الأجزاء المطبوعة لعملائنا باستخدام الدراجات.»

الفصل السادس

# برامج التصميم: لوح الرسم الرقمي

تُشكِّل برامج التصميم عالمنا؛ فتقريبًا وراء كل نموذج معماري ونموذج أولي لأي منتج ومنتج مكتمل ملف تصميم إلكتروني. إن الكرسيَّ الذي تجلس عليه، والدباسة التي على مكتبك، وسيارتك، وحتى أزرار قميصك، كانت رقمية قبل أن تصبح أجسامًا مادية؛ فملفات التصميم الإلكترونية هي لغة الهندسة الحديثة.

تُعتبر برامج التصميم القلب النابض للطباعة الثلاثية الأبعاد. ومثل الرسومات اليدوية المرسومة على الورق بالقلم التي أرشدت بناة السفن في العصر الفيكتوري خلال عملية البناء، فإن ملف التصميم يخبر الطابعة الثلاثية الأبعاد كيف تعمل.

## (١) معالج كلمات للرسم

ظهرت أولى أدوات تصميم إلكتروني بدائية وبسيطة في الخمسينيات من القرن العشرين، وكان يستخدمها الباحثون والعلماء من أجل القيام بعمليات حسابية متخصصة وعمليات محاكاة حاسوبية بدائية. ظهر أول برامج التصميم التِّجارية في السوق في الستينيات، وكان يُكلِّف نحو نصف مليون دولار (كانت تبيعه شركة تسمَّى كونترول داتا كوربوريشن). عندما كنتُ طالبًا جامعيًّا، كنا نحسد الأساتذة الذين حالفهم الحظ وتعاملوا مع كمبيوتر مركزي من إنتاج كونترول داتا كوربوريشن. كان ذلك الكمبيوتر العملاق يستغرق دقيقة لمعالجة ملف التصميم، وهو أمرٌ يمكن أن يقوم به هاتفك المحمول ثلاثين مرة في الثانية.

في عام ١٩٨٢، كتب جون ووكر، وهو المدير التنفيذي لشركة برمجيات صغيرة تسمى أوتوديسك، مذكرةً داخلية لموظفيه، وصف فيها رؤيته لتصميم جديد وجذري لأحد المنتجات البرمجية. عرض منتجه الجديد بكل حماس على أنه «معالج كلمات للرسومات»

قليل التكلفة يمكنه العمل على كمبيوتر دقيق. في نفس الوقت تقريبًا، وعلى بعد بضعة آلاف من الأميال، كان تشاك هال يُصنِّع أول أجسام بدائية بالطباعة الثلاثية الأبعاد في العالم.

بعد الكثير من النقاش بين موظفي أوتوديسك، سمى ووكر برنامج التصميم الجديد «مايكروكاد». في عصرنا الحالي، تُعتبر برامج التصميم المكتبية القليلة التكلفة منتجًا مهمًّا. لكن في ذلك العصر، كانت رهانًا على مستقبل مجهول. السبب في أن هذا البرنامج كان أداة تصميم جذرية لم يكن لأنه كان برنامجًا للتصميم بل بسبب أنه كان يمكن تشغيله على كمبيوتر مكتبي. كانت جاذبيته الأساسية في السوق تعتمد على تكلفته، فيما يخص كلًّا من سعر البرنامج وحقيقة أن مستخدمه لم يكن عليه استثمار عشرات الآلاف من الدولارات في الحصول على قدرة حاسوبية كبيرة.

كان تصور ووكر للمايكروكاد هو أنه أداة تصميم ستُوفِّر نفس الأداء الذي تُوفِّره الأدوات المنافسة الباهظة التكلفة لكن بجزء بسيط من التكلفة. كتب ووكر واصفًا البرنامج قائلًا: «يمكن تثبيته على جهاز كمبيوتر مكتبي يتراوح سعره ما بين ١٠ آلاف إلى ١٥ ألف دولار، وهو ينافس في أدائه وخصائصه أنظمة التصميم بمساعدة الكمبيوتر التي تُنتجها شركة كمبيوتر فيجن التي يُقدَّر سعرها بسبعين ألف دولار.»

في ثمانينيات القرن الماضي، كانت النمذجة الثلاثية الأبعاد مجالًا للمصممين والمهندسين المحترفين الذين يستخدمون برامج النمذجة المعتمدة على الكمبيوتر بنحو أساسي لوضع أجزاء الآلات تحت اختبارات التحمل. كانت أجهزة الكمبيوتر الدقيقة تقنية جديدة وبدائية، على نحو يشبه كثيرًا مجموعات أدوات الطباعة الثلاثية الأبعاد المنزلية اليوم. لقد كانت هذه الأجهزة ضئيلة مقارنة بأجهزة الكمبيوتر المركزية أو خوادم يونيكس المبكرة، وكانت تفتقد القوة اللازمة لتشغيل مشروعات تصميم صناعية معقدة.

خلال حقبة الكمبيوتر الشخصي التي اتسمت بالبساطة والتهور، كانت سوق أجهزة الكمبيوتر المكتبية ما تزال في بداياتها. لم يكن مليارديرات العصر الحالي — الذين سيراكمون ثرواتهم من بيع برمجيات لأجهزة الكمبيوتر الشخصية — قد أصبحوا مليونيرات في تلك الحقبة، وكانوا إلى حد كبير غير معروفين خارج الدوائر التقنية الحديثة. لم تقترب مايكروسوفت وأبل من دخول قائمة فورتشن ٥٠٠ على الإطلاق، وكان بيل جيتس لا يزال يسافر بالطائرات في الدرجة الاقتصادية.

في ذلك الوقت، كانت شركة تصميم البرمجيات الوليدة الخاصة بووكر عبارة عن وحدة غير منظمة تتألف من موظفين بدوام جزئي. وكان من المتوقع أن يعمل كل موظف ١٤ ساعة أسبوعيًّا على الأقل مقابل مرتب سنوي دولار واحد، بالإضافة إلى حصة من الأسهم.

أضاف ووكر في مذكرته قائلًا: «لا يوجد أي منتجات منافسة معروفة تخص أجهزة الكمبيوتر الدقيقة اليوم (على الرغم من وجود بعض برامج الرسومات البدائية لأجهزة أبل، ويجب أن نسعى بنحو حثيث لتفسير اختلافنا عنهم).»[1] يمكن لبرنامج مايكروكاد التعامل مع الرسومات ثنائية الأبعاد، وكان الهدف منه صنع المخططات المعمارية أو ربما أَتْمتة عملية رسم المخططات الأولية.

بعد مرور عقود، اتضح أن مايكروسوفت وأبل وأوتوديسك قامروا بنحو صحيح على أجهزة الكمبيوتر الدقيقة. وباكتساح موجة أجهزة الكمبيوتر المكتبية القليلة التكلفة المشهدَ التقني في تسعينيات القرن الماضي، استغل برنامج مايكروكاد (والمسمى الآن أوتوكاد) وغيره من برامج التصميم بمساعدة الكمبيوتر التِّجارية ذلك الزخم. وحتى الهواتف المحمولة التقليدية في العصر الحالي تمتلك قوة حاسوبية ومرئية أكبر من الكمبيوتر المركزي في السبعينيات.

اليوم، شركة أوتوديسك عالمية دخلها بمليارات الدولارات. وقد بيع أكثر من عشرة ملايين نسخة من برنامج الأوتوكاد. وقد ولَّت أيام «معالجة الكلمات من أجل الرسومات» وأصبح برنامج أوتوكاد الحديث أداة تصميم قوية للنماذج الثلاثية الأبعاد.

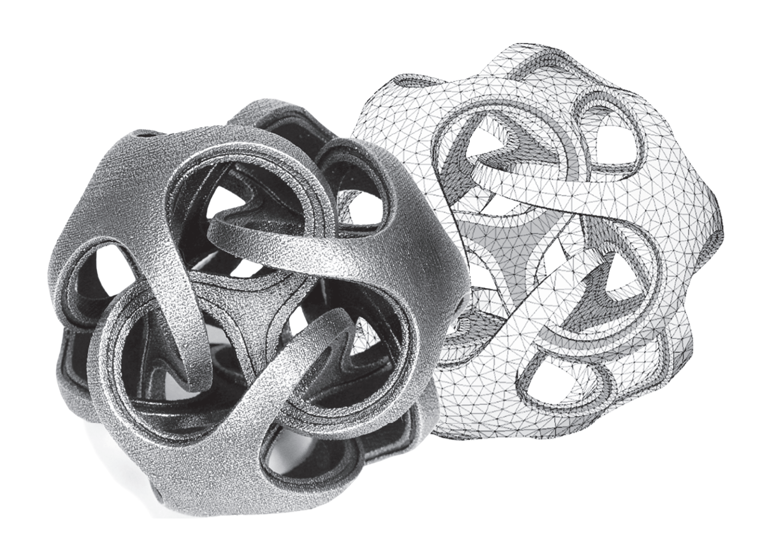
## (١-١) فهم الإحداثيات «س» و«ص» و«ع»

على أي برنامج للتصميم فهم الجوهر الثابت والهندسي للعالم المادي التناظري بسهولة، وتحويله إلى وحدات ثنائية منفصلة. يسرد الفيزيائي الشهير على مستوى العالم ريتشارد فاينمان في مذكراته محادثة صورت تلك الطبيعة غير الرمزية وغير اللفظية لهندسة الأشكال:

> في إحدى المرات، كنا نناقش أمرًا ما — لا بد أننا كنا في الحادية أو الثانية عشرة آنذاك — وقلتُ: «لكن التفكير ليس في الحقيقة إلا التحدث إلى ذاتك.»
> فرد بيني: «أوه، حقًّا؟ هل تعرف الشكل العجيب لعمود نقل الحركة في السيارة؟»
> رددت: «نعم، ما به؟»
> قال: «جيد، أخبرني الآن كيف وصفته عندما كنت تتحدث إلى نفسك.»[2]

يوضح فاينمان نقطة جيدة، فعين العقل البشري تدرك الشكل والتكوين والسلوك للعالم المادي كمجموعة سلاسل متصلة لا نهائية من الأجسام المختلفة الأشكال، لكن اختزال كل هذه المعلومات إلى مجموعة من الرموز التي يمكن العمل بها وإعادة وصفها لشخص آخر أمر صعب.

يجب على برامج التصميم تحويل عالمنا المادي المتنوع والملتبس إلى «لغة» دقيقة واضحة. تفوقت أجهزة الكمبيوتر المبكرة بسرعة على البشر في الحساب وفهم الرموز مثل الأرقام أو النصوص. وعلى الرغم من ذلك، فقد استغرق الأمر عقودًا واستثمارات كبرى في قدرة أجهزة الكمبيوتر المتاحة لمعالجة الأشكال الهندسية الأولية.



ملف تصميم (الصورة اليمنى) يصف بنحو إلكتروني الجسم المادي الذي سيُطبع (الصورة اليسرى) ويرشد الطابعة خلال مراحل الطباعة (الصورة مهداة من باتشيبا جروسمان).

يقرأ ملف التصميم الإلكتروني شكل الأجسام المادية باستخدام مجموعات من الإحداثيات «س» و«ص» و«ع»؛ فعند وصف شكل مكعب بسيط، يكفي تحديد الارتفاع والعرض والعمق، لكن عند وصف شكل أكثر تعقيدًا كزهرة، يمكن أن تصبح الأمور أكثر تعقيدًا بكثير. تَصنع أجهزة الكمبيوتر أشكالًا مثل هذه الأجسام المادية «العامة»

الثلاثية الأبعاد، على هيئة مجموعات من آلاف أو ملايين المجموعات الثلاثية من الإحداثيات «س» و«ص» و«ع».

عندما يَعرض برنامج التصميم لمستخدمه جسمًا مصممًا على شاشة الكمبيوتر، فإن معالج الكمبيوتر يعمل من وراء الكواليس على معادلات رياضية حسابية صعبة تؤدي إلى إنتاج هذه الصورة المناسبة. وفي كل مرة ينقر المستخدم على التصميم الجاري العمل عليه أو يمد أطرافه بالفأرة، يُجري الكمبيوتر بسرعة كبيرة سلسلة من الحسابات لضبط الإحداثيات «س» و«ص» و«ع» الخاصة بالجسم.

ليس من الصعب فهم تغييرات التصميم لمكعب بسيط مصنوع من مادة مفردة، لكن الأمور تزداد تعقيدًا عندما تصبح الأشكال منحنية أو معقدة، فحتى الأسطوانة البسيطة التي يمكن وصفها على نحو دقيق بارتفاعها وقطرها تحتاج إلى بعض الحسابات لعرضها بنحو صحيح بكل منحنياتها وظلالها. وبالنسبة إلى المشروع تصميم ينشئ مشعًّا معدنيًّا كثير التفاصيل، سيحتاج ملف التصميم لفهم وتتبُّع الكثير من نقاط البيانات للإحداثيات «س» و«ص» و«ع» لفهم كل منحنًى وتجويف وحافَة تكوِّن سطح الجسم.

في تسعينيات القرن الماضي، عندما أصبحت برامج التصميم متاحة للشركات العادية والشركات الهندسية الصغيرة، تغير التصميم الصناعي للأبد. وبعكس الذاكرة البشرية المتقلبة أو الرسم البياني اليدوي، فإن ملف التصميم يُصنع بعناية وتُسجَّل بياناته بنحو دقيق ومُحكم. ويمكن إرسال الملف فورًا لأي مكان حول العالم، ويمكن أن يكون المستلم غريبًا يمكنه دون أن يطلب منه ذلك دراسة المعلومات التي يحتويها الملف وحفظها وتعديل التصميم الأصلي أو ربما طباعة الجسم بنحو ثلاثي الأبعاد.

يعمل برنامج التصميم على أَتْمتة الجوانب الشاقَّة لعملية التصميم، ويقلل معالج الكلمات الوقت والورق المهدرَيْن في عملية كتابة المستندات بالآلة الكاتبة، ويخفف من مشقة تكرار التصميمات، ويمكن لأي مصمم تكرار التصميم بنحو سريع على الشاشة ثم الرجوع إلى نسخة سابقة. ومن السهل التجريب فيما يتعلق بمادة ولون سطح ما بالنسخ واللصق من أي جزء من التصميم لأي جزء آخر. ويتتبع برنامج التصميم كل تغيير يُجرى على التصميم، ويمكنه تخزين نقاط بيانات أكثر مما يمكن للبشر تذكُّره.

هل تتذكر تعلُّم كيفية رسم مكعب على الورق باستخدام قلم رَصاص؟ إذا حافظت على بساطة المكعب، فلن تجد صعوبة في رسمه على الورق، لكن إذا أردت التجريب في التصميم وإضافة بعض التفاصيل، فإن الأمور ستصعب عليك.

في المدرسة الابتدائية، أتذكَّر أني كنت أفرك ورقتي بالِمْحاة إذا ارتكبتُ خطأً أو أردت تغيير تصميم المكعب خاصتي، وإذا قررت بعد فوات الأوان أن زواياه يجب أن تُرسم بقلم رَصاص أصفر زاهٍ من البداية بدلًا من الرَّمادي، فكنت سأحتاج إلى أن أبدأ من جديد بورقة جديدة وقلم رصاص أصفر. وحتى تكرارات التصميم البسيطة كانت مكلفة من حيث الوقت والورق والإحباط. فإذا طلب مني مُدرسي أن أضيف تفاصيل لسطح المكعب أو أرسم بضعة أنفاق داخلية، فإن هذه الإضافات البسيطة ستتجاوز ما أستطيع عمله.

كانت أول تجرِبة لي مع برامج التصميم هي كتابة برنامج لتصميم رسومي في المدرسة الثانوية. في الكلية، عملت في وظيفة بدوام جزئي في مساعدة مُصنِّع هولندي في صنع صفائح معدنية بسيطة على الكمبيوتر. وتوضح حقيقة أنه طلب من طالب في سنته الجامعية الأولى ومهووس بالتكنولوجيا مساعدته في هذا كيف أن القليل من المهندسين المحترفين كانوا يستخدمون التصميم بمساعدة الكمبيوتر في تلك الأيام. صممت أنا وزميلي جاي شافيف برنامجًا بسيطًا يسمح للمهندس برسم المخطط الخارجي للصفيحة المعدنية كما لو كانت مصنوعة من الورق، مع تجاهل سُمكها المادي الحقيقي.

كانت الفكرة هي أن مسئولي الإنتاج سيُدخلون بيانات سُمك الصفيحة لاحقًا عندما يصل المخزون المادي للمصنع بالفعل. ونتيجة لهذا، فإن تصميم المهندس سيُضبط تلقائيًّا. كانت هذه مجرد فكرة بسيطة وبعيدة تمامًا عن الرسومات المتحركة في العصر الحالي التي تتميز بواقعية الصورة وآنية اللحظة ومشاهد علوية من وضع الطيران. لكن الأستاذ الجامعي المشرف عليَّ، موشيه «شيفي» شبيتالني، كان يمتلك البصيرة والفطنة ليدرك أن التصميم بمساعدة الكمبيوتر لم يكن يتعلق بتحسين التصميم نفسه فقط.

يمكن لبرامج التصوير التواصل بكل سهولة مع الأقسام المختلفة للمصنع. أتاح برنامجنا أن يتساهل المُصنِّع فيما يتعلق بمعايير التوريد، ويشتري نطاقًا أكثر اتساعًا من المواد الخام من ذلك الذي كان يمكنه الحصول عليه بمخطط تقليدي «ثابت». حقق البرنامج نجاحًا كبيرًا، وبيع في النهاية مقابل ٤ ملايين دولار (والتي حصلت أنا وصديقي منها على دولارين ونصف مقابل كل ساعة عمل).

لاحقًا، عندما كنتُ في العشرينيات من العمر وأعمل ضابطًا بحريًّا، كانت وحدتنا تمتلك قسمًا خاصًّا للمخططات الأولية. كان هذا القسم يقع في غرفة مضاءة جيدًا حيث كان العديد من الرسامين المدربين من النساء والرجال عاكفين على طاولات الرسم المنحنية يرسمون مخططات مفصلة لهيكل السفينة ومحركاتها وأجزائها الأخرى.

عملت أنا وقائدي على تقديم برنامج للتصميم الثلاثي الأبعاد لوحدة الهندسة البحرية، ونجحنا في النهاية. لكن إقناع المصممين به لم يكن سهلًا؛ فقد استثمروا عدة سنوات في تعلُّم حرفتهم، وكان هناك قلة شجاعة — عادةً ما كانوا من الملتحقين الجدد بالخدمة — مستعدة لتعلم كيفية استخدام أدوات التصميم الإلكترونية. على الرغم من ذلك، وفي النهاية، فقد أدرك الجميع — حتى أصحاب المناصب العليا — أن برامج التصميم ليست فقط أكثر كفاءة، لكنها، وبغضِّ النظر عن تكرارات التصميم، تمتلك قدرة داخلية على إجراء حسابات وتوقعات لا يمكن لبشر القيام بها.

كان المهندسون المعماريون البحريون يستطيعون رسم شكل خزان المياه على الكمبيوتر وبعد ذلك — استجابة لمعلومات من الأقسام اللوجستية — يغيِّرون حجمه رقميًّا بنحو سريع. ويمكنهم على نحو افتراضي «وزن» الخزان وتحديد تكلفة تصنيعه. أهم ما في الأمر هو أن الكمبيوتر يمكنه حساب أثر اختيارات شكل وحجم الخزان على استقرار السفينة في أعالي البحار؛ وهو أمرٌ يستغرق من أي مختص ما يزيد على الأسبوع.

أفضل ما تقدمه برامج التصميم هو أنها تحوِّل العالم المادي إلى عالم رقمي مما يوفر كل فوائد الأَتْمتة لعملية التصميم. أما ما يعيب هذه البرامج فهو أنها، وحتى اليوم، ما زالت غير قادرة على قراءة الماهية الكاملة للأجسام المادية رقميًّا. إن أجهزة الكمبيوتر تتعامل مع مجموعات متوقعة من عدد محدد من العناصر؛ على سبيل المثال، حساب كل مجموعات حركات الشطرنج المختلفة والممكنة التي يمكن للاعبي شطرنج القيام بها. لكن العالم المادي لا يمكن اختزاله في سهولة إلى مجموعة من الاحتمالات المحدودة.

## (٢) برامج التصميم اليوم

تتطور تقنيات الطباعة الثلاثية الأبعاد وبرامج التصميم معًا لتغير الطرق التي يصمم ويصنع بها الناس الأشياء. على الرغم من ذلك، فإن علاقتهما معًا كانت من طرَف واحد على الأغلب؛ فقد تطورت الطباعة الثلاثية الأبعاد اعتمادًا على برامج التصميم، لكن العكس غير صحيح. لكن في الحقيقة، فإن برامج التصميم بدأت الآن فقط في النظر إلى الطباعة الثلاثية الأبعاد بنحو جدِّيٍّ كوسيلة رائعة للتصميم.

ليس هناك الكثير مما يمكن لملف التصميم أن يعطيه للطابعة الثلاثية الأبعاد؛ فإذا كنا سنطبع صخرة «حقيقية» أو روبوتًا مكتمل الوظائف أو كُلية جديدة، فستحتاج إلى برامج التصميم لزيادة قدراتها. ومعظم الأجسام المنتَجة بأعداد كبيرة تُصنع من أجزاء

منفصلة وتُجمَّع بدلًا من صناعتها في قطعة واحدة معقدة التصميم. لا تستطيع برامج التصميم تخطيط ما تحت سطح الجسم؛ ولذا فإن التفاصيل الداخلية للجسم تظل بعيدة عن متناول الكمبيوتر وبرنامج التصميم العاديين.




جسم مطبوع بنحو ثلاثي الأبعاد لنموذج صلب لمحرك توربيني نفاث صُمِّم ببرنامج أوتوديسك إنفنتر (الصورة مهداة من جونزالو مارتينيز من شركة أوتوديسك).

اليوم، هناك قسمان رئيسيان لبرامج التصميم المتاحة للطباعة الثلاثية الأبعاد؛ القسم الأول يسمَّى «النمذجة الصلبة» ويستخدمه المهندسون والمصممون الصناعيون. يوفر هذا النوع من البرامج لمستخدميه مكتبة جاهرة من المكعبات والأسطوانات والأجسام الكُرَوية، وغير ذلك من الأشكال المادية المعيارية التي يمكن قطعها ومطها ودمجها بنقرات من فأرة الكمبيوتر. الغرض من هذه المجموعة الجاهزة من الأشكال هو تسهيل عملية التصميم. ومن هناك، يعدل المصمم ويضبط لبنات البناء الأساسية هذه من الأشكال المعدة مسبقًا في تصميمات فريدة.

القسم الثاني لبرامج التصميم يسمى «نمذجة الأسطح». بدأت الاستعانة ببرامج نمذجة الأسطح في مجال تصميم الرسوم المتحركة، ومؤخرًا استعانت بها شركات تصميم الرسوم وألعاب الفيديو، وهي تعمل بنحو رائع عندما لا يمكن تصميم شخصية رسوم متحركة أو عالم خيالي بنحو مناسب بتوفير مكتبة جاهزة من الأشكال الأساسية.

## (٢-١) تصميم أجزاء الآلات: النمذجة الصلبة باستخدام الكمبيوتر

نشأت برامج النمذجة الصلبة من التصميم الصناعي والتصنيع، وتتميز حزم تلك البرامج بالكفاءة، وتُوفِّر مكتبة جاهزة ومدمَجة من الأشكال الأساسية والأشكال الهندسية المعيارية لأجزاء الآلات التي يمكن تعديلها ودمجها بسرعة. على سبيل المثال، يمكن دمج أسطوانتين معًا لصنع مِطرقة، ويمكن طرح أسطوانة ثالثة من الشكل لصنع ثقب يتيح تعليقها على الحائط. وبسبب أن برنامج النمذجة الصلبة يقدِّم أي شكل على هيئة مجموعة من الأحجام، فإن معظم الطابعات الثلاثية الأبعاد اليوم يمكنها «التحدث» إلى هذه الأنواع من ملفات التصميم بطلاقة.

تمتلك برامج النمذجة الصلبة سنوات من تجارِب التصنيع والتصميم مدمجة بها، وهذا واضح أثناء استخدامها. «تتحدث» تلك البرامج بمفردات المصانع القديمة باستخدام كلمات مثل دفق وحفر وشطف، وهي تعرض عمليات التصميم بنحو واقعي قابل للتمييز؛ على سبيل المثال، كثقب محفور أو قطع مفرغ أو حافَة منحنية.

ظهرت برامج النمذجة الصلبة في التسعينيات من القرن الماضي عندما زادت قدرة أجهزة الكمبيوتر لدرجة أنه بات يمكن لبرنامج التصميم «تذكُّر» تكرارات التصميمات السابقة، والسماح للمستخدم بالتبديل بينها، والتراجع عن تغييرات وتغيير أبعاد بأثر رجعي. إننا ننتظر بنحو مسلَّم به الآن من الكمبيوتر الخاص بأي منا أن يتذكر كل نسخة من أي مستند أو جدول إلكتروني أو ملف تصميم لكن الأمر لم يكن دائمًا بهذه السهولة. لكن عندما اكتسبت برامج التصميم أخيرًا هذه القدرات، عصف هذا بعالم التصميم بمساعدة الكمبيوتر. أتاحت النمذجة البارامترية للمصممين تعديل وتحرير تصميماتهم، من دون الاحتياج إلى أقلام رَصاص ومماحٍ وقطع ممزقة من الورق.

ساهمت برامج التصميم في انسيابية تدفق العمل، وحسنت من التواصل، ومكَّنت الشركات من تخزين معلومات التصميم. وقبل أن تصبح برامج التصميم جزءًا مهمًّا من عملية التصنيع، كان المصممون والمهندسون والمصنعون يعملون في غرف نظامية متفرقة

لكنها مرتبطة بعضها ببعض على نحوٍ ما. أما اليوم، فيمكن لأداة النمذجة الصلبة إخبار مستخدميها إن كان أي تصميم مقترح لآلة جديدة سيخرج بنحو مناسب عندما يوضع في آلة قولبة بالحقن باستخدام نوع معين من البلاستيك الأخضر. كما يمكن لبرامج التصميم مساعدة المصممين في تقليل عدد الأجزاء المتفرقة للتقليل من تكلفة التصنيع والتجميع.

يمكن لحُزَم التصميم بمساعدة الكمبيوتر التِّجارية أن تكون مرتبطة بسلسلة التوريد الخاصة بأي شركة، فإذا رغب المهندسون في تغيير حجم أو تركيب جزء رئيسي من محرك، فيمكنهم فحص التغيير بفحص مخزون الشركة لمقارنة التصميم الجديد لهذا الجزء بالأجزاء الموجودة بالفعل. إذا أضيفت أداة جديدة لمخزون الشركة، فسيُسجَّل إن كان لها أثر على المكونات الأخرى وستُبلَّغ وتُحدَّث سلسلة التوريد بالكامل.

## (٢-٢) رسم شخصيات على الشاشة: برامج الرسوم الإلكترونية الثلاثية الأبعاد

إذا كانت النمذجة الصلبة قد نشأت في أوساط المهندسين، فإن برامج نمذجة الأسطح نشأت في أوساط مصممي الرسوم المتحركة والرسامين. ترجع أصول برامج نمذجة الأسطح إلى حقل الترفيه؛ صناعة أفلام الرسوم المتحركة والسينما وألعاب الفيديو. اليوم، يستخدم العلماء برامج النمذجة الثلاثية الأبعاد لصنع نماذج لتكوينات الحَمض النووي أو المركبات الكيميائية، كما يصنع المهندسون المعماريون ومنسقو المواقع نماذج جميلة تزخر بالتفاصيل لبيع مشروعاتهم للعملاء المحتملين.

وإذا كان الكمبيوتر يحتاج إلى الإحداثيات «س» و«ص» و«ع» للمواقع لفهم شكل الجسم، فكيف يمكنه التقاط جميع التفاصيل الخاصة بشخصية متحركة أو جزَيْء معقد التكوين؟ تلتقط نمذجة الأسطح تفاصيل العالم عن طريق التغطية الرقمية للأشكال بشبكات افتراضية تشبه شبكات الصيد مصنوعة من أشكال هندسية قياسية مضلعة. وتسمَّى أحيانًا نمذجة الأسطح ﺑ «النمذجة المضلعة» حيث يطابق كل شكل مضلع يكوِّن الشبكة الافتراضية نقطة بيانات على سطح الشبكة النظرية.

يخزن برنامج التصميم كل نقطة بيانات حتى يمكن للمصمم استخدامها، ومعظم النماذج الثلاثية الأبعاد اليوم مصنوعة من سطح شبكي مثلث بسبب سرعتها، ويمكن للكمبيوتر التعامل مع هذه المعلومات بسهولة. على الرغم من ذلك، ومهما كانت دقة تفاصيل غِلاف الأشكال المنحنية، فإن المثلثات في النهاية أشكال مسطحة وليست منحنية.

الجانب الإيجابي لبرامج نمذجة الأسطح هو أنها مثالية لتصوير تنوع الكون من حولنا؛ فيمكن لهذه البرامج تصوير عوالم خيالية جميلة المنظر ومليئة بالتفاصيل في الأفلام وألعاب الفيديو. وبتحررها من عبء المجموعات المحدودة من أشكال المكعبات والأجسام الكُرَوية البدائية، وبتأكيدها على عرض ما يحدث على السطح بدلًا من عرض كيفية ملاءمة أجزاء الآلة بعضها لبعض، فإنها تُعتبر لوحًا فارغًا للرسم أمام مصمم الرسوم. إنها نقطة بداية يمكن للمصمم إضافة المزيد من التفاصيل إليها مثل لَمعان السطح والتركيب والجلد والشعر الواقعيين والبراري.

لكن برامج نمذجة الأسطح لها عيوبها؛ فالرسومات المتحركة تحتاج إلى التحرك بسلاسة على الشاشة، وأن تبدوَ واقعية. وإذا كان الضوء يسطع على وجه إحدى الشخصيات، فيجب عليه أن ينساب مع حركات الشخصية، كما يجب على الخلفية التحرك بسرعة مناسبة. والحفاظ على هذه التفاصيل الدقيقة عملية تسمى «التصيير».

التصيير السريع يصنع رسومًا مرئية واقعية لحد كبير. ويعتمد التصيير على خوارزميات مدمجة في برنامج التصميم تعمل بنحو آنيٍّ لدفع أي فعل للأمام، ويؤدي التصيير السريع ببرامج نمذجة الأسطح إلى استنزاف موارد الكمبيوتر. ومن الممكن طباعة تصميمات منشأة بأحد برامج نمذجة الأسطح على نحو ثلاثي الأبعاد (على سبيل المثال، تُعتبر طباعة صورة اللاعب في أي لعبة فيديو بنحو ثلاثي الأبعاد من التطبيقات الشهيرة لهذا النوع من الطباعة). على الرغم من ذلك، وكما ذكرنا سالفًا، فإن طباعة شكل السطح ليست كافية؛ فتهيئة تصميمات نمذجة الأسطح ليسهل طباعتها بنحو ثلاثي الأبعاد تتطلب بضع خطوات إضافية.

في الواقع فإن معظم أدوات التصميم الحديثة يمكنها القيام بالقليل من كلٍّ من النمذجة الصلبة ونمذجة الأسطح، ومن السهل إلى حد ما تحويل نموذج صُلب لنموذج سطحي بصنع شبكة افتراضية للجسم المصمَّم. على الرغم من ذلك، فإن التحول من شبكة لنموذج صُلب أكثر صعوبة؛ فمن السهل نسبيًّا تحويل نغمات موسيقية لملف صوتي بصيغة إم بي ثري، لكن العكس أقل سهولة، وقد وجه العديد من العلماء جهودهم في محاولة حل هذه المشكلة لكنها تظل مشكلة صعبة الحل حسابيًّا.

## (٣-٢) التصميم أم المسح الضوئي؟

تزداد شهرة المسح الضوئي كطريقة لالتقاط تفاصيل الأجسام المادية بنحو رقمي. منذ فترة ليست بالطويلة، كان المسح الضوئي لأي شيء يعني مسح مستند ورقي أو صورة

فوتوغرافية لتحويلها إلى ملف رقمي. أما اليوم، فإن الناس يمسحون واجهات المباني من أجل المشروعات المعمارية أو يستخدمون الرنين المغناطيسي لمسح مَرفِق به ألم للبحث عن علامات وجود تمزق في الأربطة.

يقوم مسح البيانات كذلك بتمثيل شكل وأبعاد العالم المادي على هيئة مجموعة من الإحداثيات الثلاثية الأبعاد. تقبع بيانات المسح في مكان ما بين الأشكال البدائية لبرامج النمذجة الصُّلبة والشبكة التخيلية التي تلف الأجسام الرقمية في برامج نمذجة الأسطح. تخيَّل أنك غمرت نفسك في الصمغ ثم وضعتها في كومة ضخمة من قصاصات الورق الملون الرفيعة. حين تقف ستجد أن القصاصات التصقت بك في كل مكان، وأن سطح جسدك أصبح مغلفًا بطبقة كثيفة من النقاط الملونة المتناهية الصغر.

تخيَّل الآن أن شخصًا يشاهد هذا المنظر يمتلك الصبر لتسجيل موقع كل قطعة مفردة لاصقة من القصاصات الملونة على جسدك بكل دقة. ربما في محاولته الأولى، سيسجل هذا الشخص بصبر موقعَ كل قصاصة ملونة على نحو وصفي؛ على سبيل المثال، «قصاصة مفردة حمراء على طرَف الأنف». لكن بعد بذل مجهود شاقٍّ في كتابة موقع كل قصاصة، يدرك الشخص طريقة أكثر كفاءة لالتقاط تفاصيل جسدك المغطى بالقصاصات بكل ألوانها، ألا وهي تدوين موقع كل قصاصة ورقية متناهية الصغر، طبقًا لموقعها الدقيق في الفضاء أو بالإحداثيات «س» و«ص» و«ع» خاصتها.

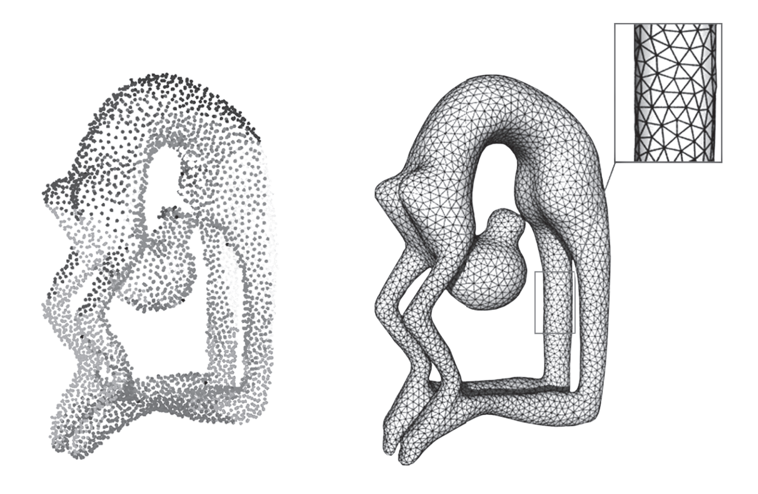
هذه هي الطريقة التي تلتقط بها الماسحات الضوئية بنحو أساسي الأبعاد المادية للأجسام مثل سطح مغطًّى بالقصاصات الرقمية. كل قطعة من القصاصات الرقمية تُمثِّل نقطة بيانات، وتحتوي كل نقطة من هذه النقاط على معلومات عن موقع كل نقطة صغيرة تقع على سطح جسمك في الفضاء الثلاثي الأبعاد والمسجلة كمجموعة من الإحداثيات «س» و«ص» و«ع».

اسم آخر يمكن إطلاقه على هذه القصاصات الرقمية التي تغطي أسطح الأجسام هو «السحابة النقطية». تلتقط معظم الماسحات السحابة النقطية رقميًّا وتغذي جهاز كمبيوتر بها، وبعد تحميل بيانات المسح لبرنامج تصميم، يُجري البرنامج سلسلة من الحسابات السريعة لتحويل هذه السحابة النقطية إلى سطح شبكي، أحيانًا تحسب نقاط البيانات المفقودة المطلوبة لملء فجوات السطح.

العلاقة بين الطباعة الثلاثية الأبعاد والسحابات النقطية علاقة شديدة التناغم. يفتح مسح البيانات عالمًا جديدًا من احتمالات التصميم ويطلق القدرة الحقيقية الثورية

للطباعة الثلاثية الأبعاد. ويفيد المسح في التقاط الجوانب الهندسية للجسم الذي لا يوجد له ملف تصميم؛ على سبيل المثال، الأجسام الطبيعية مثل النباتات والحيوانات والناس والنماذج التشريحية، وكذلك الأجسام الجامدة مثل الصخور، وحتى المناظر الطبيعية. يفيد المسح كذلك في التقاط أشكال الأجسام الصناعية عندما لا يتوافر الملف الأصلي للتصميم أو لا يوجد من الأساس؛ مثل الأجسام الأثرية والأجزاء المكسورة.

في رأيي، فإن بيانات المسح هي الجسر الذي سيقلل الفجوة بين العالَمَين المادي التناظري والرقمي الثنائي. فتعد الأجسام المادية التي تخضع للمسح وإعادة الإنتاج بداية الخط المتلاشي بين الأصل والنسخة، بين العمل المحمي بحقوق النسخ والعمل المشتق. فبيانات المسح، بمجرد التقاطها في ملف تصميم، يمكن تعديلها وتكرارها ونسخها. ويومًا ما، سنقدر على إدخال تعديلات على العالم المادي من حولنا بسهولة تعديلنا للصور الرقمية.



بيانات سحابة نقطية والسطح الشبكي المقابل لها (الصورة مهداة من ليجانج ليو، جامعة تشجيانج، الصين).

أما المعوقات التي تواجه المسح، فهي قدرة أجهزة الكمبيوتر وعدم وجود خوارزميات ذكية بما يكفي من أجل «ملء الفجوات» لإكمال تفاصيل أي سحابة نقطية رقمية. إن الكمبيوتر لا يفهم بالضرورة ما مسحه؛ لذا لا يمكنك فقط مسح زهرية ورود ثم تطلب

من الكمبيوتر جعل أحد أسطحها أكثر سمكًا؛ لأنه لن يدرك بالتحديد أين يبدأ السطح وأين ينتهي، وأي اتجاه يجب أن يصبح أكثر سمكًا. ومثل أي أدوات برمجية رقمية أخرى، فإن البيانات الممسوحة ضوئيًّا لا تلتقط التفاصيل الداخلية للجسم، لكن هذا آخذ في التغير الآن بفضل تطور تقنيات التصوير الطبي التشخيصي مثل ماسحات الأشعة المقطعية والرنين المغناطيسي والموجات فوق الصوتية.

## (٤-٢) لماذا لا تستطيع برامج التصميم مواكبة التطور؟

ما زالت برامج التصميم الحديثة ترزح تحت قيود جذورها الأصلية، ونعني بهذا حقيقة أنها نشأت من مجالي التصنيع وصناعة الرسوم المتحركة اللذين بدأ فيهما مؤخرًا فقط استخدام الطباعة الثلاثية الأبعاد. إن نفس أدوات التصميم التي كانت موجهة للتعامل مع قدر محدود من القدرة الحاسوبية وتوفير الوقت والمال وتحسين نقل المعرفة، تفرض — للمفارقة — قيودًا كذلك على ما يمكن طباعته بنحو ثلاثي الأبعاد؛ وكنتيجة لهذا، فإن ملف التصميم لا يصور التفاصيل الداخلية للأجسام المادية (على الأقل من دون أي عمل إضافي مخصص). كذلك لا يمكن لبرامج التصميم صياغة سلوك التركيبات المعقدة من المواد الخام المتنوعة والتنبؤ به بنحو بياني.

على سبيل المثال، تعاني برامج النمذجة الصلبة من أن مكتبتها المعيارية للأشكال البدائية لا يمكن دائمًا تعديلها وتحريرها للحصول على أشكال هندسية غير منتظمة. على الرغم من ذلك، فإن الطابعة الثلاثية الأبعاد يمكنها صنع أشكال غير منتظمة وغير معتادة، لا يمكن لآلات التصنيع التقليدية صنعها؛ لهذا فإن الكثير من القدرات التصميمية تبقى من دون استخدام. ولا تقدِر برامج النمذجة الصُّلبة على تلبية مطالب فضاء التصميم هذا، الجديد وغير المستغل بنحو كبير. وباستمرار تطور تقنيات الطباعة الثلاثية الأبعاد فإن النمذجة الصلبة التقليدية ستصبح تقنية تصميم بالية؛ أي أداة قوية لكنها بنحوٍ ما بدائية.

تتشارك برامج نمذجة الأسطح التي يستخدمها مصممو الرسوم المتحركة وألعاب الفيديو في قيد مماثل؛ ألا وهو غياب بيانات التصميم اللازمة لوصف التفاصيل الداخلية لأي جسم، فإذا كنتَ ستصمم وستحاول طباعة إبريق شاي ملون ومليء بالتفاصيل، ومغطًّى برسومات مبهجة بنحو ثلاثي الأبعاد، فربما سيبدو ذلك الإبريق رائعًا من الخارج لكنه لن يؤديَ وظيفته. ولأن ملف التصميم لم يحدد شكل تجويف الإبريق الداخلي أو أن يكون بزبازه مجوفًا، وأن يلائم غطاؤه فتحته العليا، ويكون سهل الفتح في آنٍ واحد؛

فإن الإبريق المطبوع بنحو ثلاثي الأبعاد سيفتقد لأي نوع من الهيكل الداخلي، وسيصبح غير قابل للاستخدام.

وحتى التصميمات الثلاثية الأبعاد متقنة التصميم وشديدة التفصيل، لا يمكنها إرشاد الطابعات الثلاثية الأبعاد خلال عملية الطباعة لأي شيء تحت سطح الجسم المطبوع، وبالنظر إلى منشأ برامج نمذجة الأسطح، فإن هذا القيد منطقي. لم يحتَجْ مصممو الرسوم المتحركة من قبلُ لطباعة «ملفات التصميم» خاصتهم بنحو ثلاثي الأبعاد. وهناك بعض البرامج المتخصصة التي يمكنها «تخمين» شكل ما يقع تحت السطح وملء التفاصيل الناقصة، لكن هذه العملية غالبًا ما تكون عرضة لحدوث الأخطاء والإخفاقات.

إن طباعة ما تحت السطح مجرد تحدٍّ واحد من ضمن تحديات أخرى. أحد تلك التحديات هو حقيقة أن الطباعة الثلاثية الأبعاد قادرة على صنع أجسام معقدة جدًّا، تتضمن تصميماتها نقاط بيانات أكثر مما يمكن لقدرة أجهزة الكمبيوتر اليوم التعامل معه. على سبيل المثال، تخيَّل أنك أردت تصميم وطباعة درع بنحو ثلاثي الأبعاد، مكون من ملايين الحلقات المتناهية الصغر المصنوعة من مزيج من أنواع البلاستيك، بعضها طري وبعضها صُلب؛ سيكون النسيج المكتمل المطبوع مرنًا ليطابق جسدك بدقة.

بالاستعانة ببرنامج للنمذجة الصلبة، ستجد أن تصميم حلقة واحدة من درع الزرد يُعتبر أمرًا بسيطًا وسريعًا، لكن صنع ملايين من هذه الحلقات المتناهية الصغر وربطها معًا مَهمة مرهقة ومضيعة للوقت. وإذا كان يجب عليك تخصيص نوع مختلف من البلاستيك لكل حلقة في الدرع، فلن يستطيع الكمبيوتر إكمال العمل، وحتى لو استطاع الكمبيوتر تتبُّع كل الأنواع المستخدمة من البلاستيك، فإن النمذجة الثلاثية الأبعاد للدرع ستفوق قدرة أي أداة تصميم تقليدية في العصر الحالي.

تتجه الطباعة الثلاثية الأبعاد للتصنيع باستخدام العديد من أنواع المواد الخام، وهي ساحة أخرى ليست برامج التصميم مستعدة لخوضها بعدُ؛ فامتلاك القدرة على الطباعة بالعديد من المواد الخام المختلفة في نفس المرة يمكِّن المصممين من مزج المواد الخام بطرق جديدة تمامًا لم تكن ممكنة في التصنيع التقليدي. ولا تتيح فقط الطباعة المتعددة المواد الخام إنتاج أجسام معقدة ومتعددة الأجزاء في عملية واحدة، بل تسمح كذلك بصنع أنواع جديدة تمامًا من المواد الخام؛ مثل المواد الخام المُدرَّجة التي تتحول تدريجيًّا من نوع إلى آخر.

مع ذلك، فإن التحدي يكمن في أن برامج التصميم ليست مستعدة بعدُ للتعامل مع مواد خام متعددة، وشتانَ الفارق بين تصميم أداة من الصلب أو التيتانيوم، وتصميم

أخرى من مزيج من التيتانيوم الخفيف من الداخل، الذي يتحول إلى صُلب صلد كلما اتجهنا للخارج. وفي الوقت الذي يمكن فيه لبعض الطابعات الثلاثية الأبعاد بالفعل صُنع أداة معقدة من عدة مواد خام، فلم يوجد برنامج تصميم بعدُ يمكنه إتاحة هذا.



يد بشرية طُبعت مباشرةً بنحو ثلاثي الأبعاد بالاستعانة بصورة أشعة مقطعية من دون تحويل بيانات المسح لملف إس تي إل أو سطح شبكي (الصورة مهداة من دانييل دايكوفسكي من شركة أوبجيت).

صعوبة أخرى تظهر عند مزج العديد من المواد الخام بطرق جديدة؛ إذ تتغير خواص المادة بنحو جذري في بعض الأحيان بتغيُّر شكل الجسم المطبوع، مما يزيد من التعقيد الذي ما زالت برامج التصميم اليوم غير قادرة على التعامل معه. وتَعِد القدرة على مزج العديد من أنواع المواد الخام المختلفة في جسم ملموس مطبوع بقدر كبير من الاحتمالات التصميمية الجديدة؛ لكن حتى تتطور هذه البرامج لمواجهة التحدي، فهذه الاحتمالات ستبقى غير مستكشفة.

عندما يمتلك الجزء المُصمَّم سمات بارزة معقدة ودقيقة أو يتكون من مواد خام متعددة أو يتضمن سطحه ملايين الأسطح المختلفة وكثيرة التفاصيل؛ فيجب أن يشغل ملف التصميم خاصته قدرًا كبيرًا من الذاكرة. وهذا يوضح لماذا لا تقدِر بعدُ برامج التصميم الحديثة اليوم على صنع نموذج مليء بالتفاصيل ليد بشرية كاملة من لحم ودم، بخلاياها ونهاياتها العصبية وتركيبات أوعيتها الدموية.

## (٣) ما تصممه ليس (بالضرورة) هو ما تطبعه

إن تحويل ملف التصميم لجسم قابل للطباعة هو ما يوضح العلاقة الطويلة التي من طرف واحد بين الطباعة الثلاثية الأبعاد والتصميم بمساعدة الكمبيوتر. واستجابة لهذا، فإن من يُصنعون ويعملون بالطابعات الثلاثية الأبعاد ابتكروا طرقًا لمساعدة ملفات التصميم في إخراج الأجسام المطبوعة كما هو مخطط لها. بعض البرامج مثل ماتريالايز ماجيكس ونيتفاب تعمل كأدوات «إصلاح» لمساعدة المستخدمين في تحديد وتصحيح أي خطأ موجود في ملفات التصميم خاصتهم.

نريد هنا ذكر جانب آخر من الطباعة الثلاثية الأبعاد متعلق ببرامج التصميم بنحو مختصر؛ ألا وهو ملفات إس تي إل. (هل تذكرون جون تي لي من شركة إيه بي سي إيمدجنج؟) لإعداد ملفات تصميم العملاء للطباعة، كان جون يحوِّل هذه الملفات لصيغة ملفات سي تي إل. تلعب هذه الملفات دورًا مهمًّا في تحويل ملف التصميم لصيغة يمكن طباعتها بنحو ثلاثي الأبعاد.

### (٣-١) المعيار الحالي: صيغة إس تي إل

المعايير وصيغ الملفات هي لغة التعامل في التكنولوجيا وأساس مهم للعمل البيني فيما بين التقنيات. على سبيل المثال، فإن صيغة ملف إم بي ثري أتاحت للجميع — بما في ذلك صنَّاع المشغِّلات الموسيقية ومستهلكوها — تبادل وبيع وشراء وتنزيل الملفات الموسيقية، جاعلة صناعة الموسيقى الحالية ممكنة. والصيغ المعيارية المماثلة للملفات هي القلب التجاري النابض للأشكال الأخرى من الوسائط؛ فكل الكاميرات الرقمية تحفظ الصور بصيغة جيه بي إي جي، والتي تتوافق مع طابعات الليزر وبرامج تصفُّح الإنترنت.

يمتلك عالَم الطابعات الثلاثية الأبعاد صيغة ملفات معيارية خاصة به هي إس تي إل. بدأ استخدام هذه الصيغة في ثمانينيات القرن الماضي، عندما كانت الطابعات

الثلاثية الأبعاد مجرد أدوات جديدة لصنع النماذج الأولية، وكانت أجهزة الكمبيوتر وبرامج التصميم ما زالت نسخًا ضعيفة وقليلة الإمكانيات مما هي عليه اليوم. ومثل برامج التصميم في العصر الحالي المحدودة بعيوبها الأساسية، فإن صيغة الملفات هذه صُممت لتبسيط طباعة ملفات التصميم على الطابعات الثلاثية الأبعاد الناشئة.

للتحويل الرقمي لملف التصميم لصيغة يمكن طباعتها بنحو ثلاثي الأبعاد، فإن ملفات إس تي إل الأولى كان يجب عليها تذكُّر حقيقة أن الطابعات الثلاثية الأبعاد لا تستطيع التعامل مع الكثير من التفاصيل المادية. كانت ذاكرة أجهزة الكمبيوتر محدودة وباهظة الثمن في ذلك الوقت؛ ولهذا فإن حقيقة أن صيغة الملفات هذه كانت تحذف معظم تفاصيل التصميم كانت أمرًا مثاليًّا في ظل القدرة الحاسوبية المحدودة المتاحة. على سبيل المثال، يمكن لملف التصميم الاحتواء على معلومات اللون وتفاصيل تصميمة أخرى دقيقة، كانت مهمة ملف إس تي إل التخلص منها. وأي طابعة قياسية ثلاثية الأبعاد كانت تحتاج فقط إلى معالجة المثلثات التي تلمس الطبقة الحالية التي تُطبع، ويمكنها تجاهل المثلثات الباقية بنحو مؤقت حتى يحين وقت صناعة الطبقة التالية.

بعد مضي ثلاثة عقود، ما زالت ملفات إس تي إل موجودة، لكن فائدتها الأساسية أصبحت عاملًا يحد من احتمالات التصميم للطباعة الثلاثية الأبعاد؛ فإذا أرادت الطباعة الثلاثية الأبعاد أن تحقِّق كل ما تبشِّر به، فإن صيغة إس تي إل — التي ظلت قيمة لعقود — تحتاج للتواري عن الأنظار، وبرامج التصميم آخذة في التطور، وكذلك الطابعات الثلاثية الأبعاد.

اليوم، تتعامل برامج التصميم بنحو روتيني مع ملفات التصميم التي تتضمن مليارات إحداثيات المواقع أو الشبكات الدقيقة والمعقدة، بالإضافة إلى ذلك، فإن أفضل الطابعات الثلاثية الأبعاد اليوم يمكنها مواكبة هذا، وتقترب من الطباعة بدقة تساوي ١ ميكرون. على الرغم من ذلك، فإن ملف إس تي إل، الذي هو الجسر الحيوي بين هاتين التقنيتين، لا يمكنه مواكبة التطور.

### (٣-٢) المعيار الجديد: صيغة إيه إم إف

إحدى الطرق المكنة لتغيير وتحديث ملف إس تي إل هو أن يُستبدل به معيار جديد قائم على لغة الإكس إم إل يُدعى إيه إم إف. بصراحة، لقد شاركتُ في وضع هذا المعيار؛ لذا فأنا من مناصريه بطبيعة الأمر. لقد عملت على وضع هذا المعيار مع مجموعة من مُصنعي

الطابعات الثلاثية الأبعاد وموفري برامج التصميم بمساعدة الكمبيوتر ومستخدمين خبراء. عملنا معًا في إطار مؤسسة دولية تدير تطوير وتنفيذ المعايير التكنولوجية، وهي الجمعية الأمريكية لاختبار المواد.

يحافظ هذا المعيار الجديد على بناء السطح الشبكي لصيغة إس تي إل، لكنه أضاف المزيد من القدرات لعكس التطور في برامج التصميم والطابعات الثلاثية الأبعاد. على سبيل المثال، فإن تلك الصيغة يمكنها التعامل مع ألوان ومواد خام مختلفة وصنع شبكات وهياكل أخرى داخلية كثيرة التفاصيل، تُعتبر إحدى الفوائد الكبرى للتصنيع بالإضافة. ويمكن استخدام المثلثات المنحنية في تصوير الأسطح المنحنية بنحو أكثر دقة وإحكامًا من المثلثات المسطحة التي تستخدمها صيغة إس تي إل.

صدقت منظمة المعايير رسميًّا على معيار إيه إم إف في مايو من عام ٢٠١٠، لكن الاختبار الحقيقي لأي معيار هو العمل به. في وقت كتابة هذا الكتاب، لم يستخدمه بعدُ موفرو الطابعات الثلاثية الأبعاد، وربما يستغرق الأمر سنوات؛ فنحن عالقون في معضلة عويصة: موفرو برامج التصميم بمساعدة الكمبيوتر وشركات الطابعات الثلاثية الأبعاد، في انتظار رؤية إن كان هناك من سيقامر بالاعتماد على المعيار الجديد، والاستغناء عن حصان الحرب القديم المرهَق؛ صيغة إس تي إل.

## (٤) الجيل التالي من برامج التصميم: الالتقاط الرقمي

إذا كان الجيل الأول من برامج التصميم امتطى موجة أجهزة الكمبيوتر المكتبية والتصنيع التقليدي، فإن الجيل الجديد منها سيركب موجة «الالتقاط الرقمي» أو «التقاط تفاصيل الواقع». يكمن مستقبل تسويق برامج التصميم في جعل التقاط تفاصيل الواقع أمرًا متاحًا يمكن للجميع استخدامه، وسيحتدم سباق الاستيلاء على أسواق المستهلكين بين شركات البرمجيات. تأمُل شركة أوتوديسك — وهي نفس الشركة التي أطلقت برنامج مايكروكاد، معالج الكلمات للرسوم، في الثمانينيات من القرن الماضي — أن تكون مرة أخرى على قمة موجة التغيير الكبرى القادمة. كان رد أوتوديسك هو صنع «وان تو ثري دي» وهي مجموعة من أدوات التصميم المجانية الموجَّهة للأطفال وعامة المستهلكين.

تبني شركات تصميم بمساعدة الكمبيوتر أخرى (مثل سوليد ووركس وبي تي سي وراينو وستكش أب، على سبيل المثال لا الحصر) وحدات برمجية للمصممين. لكن، ومثل أي مجال عمل آخر احتل مكانه في حقل ناضج ومكتمل، فإن شركات برمجيات



جمجمة مطبوعة بنحو ثلاثي الأبعاد التُقطت تفاصيلها رقميًّا ببرنامج وان تو ثري دي كاتش (الصورة مهداة من جوش مينجز).

التصميم تواجه اختيارًا يصعب تخطيه؛ فمن ناحية، يجب على الشركة تهيئة وإعداد مواردها التنظيمية لاستغلال فرصة السوق الجديدة هذه؛ ومن ناحية أخرى، يجب عليها الاستمرار في الحفاظ على محرك إنتاجيتها الأساسي الذي لا يزال يخدم ٩٩ بالمائة من التصنيع التقليدي (ويدر عليها ربحًا).

يقول جونزالو مارتينيز، نائب رئيس قسم المنتجات الاستهلاكية بأوتوديسك: «مستقبل برامج التصميم يكمن في تسهيل الانتقال ذهابًا وعودة بين الواقع والبرمجيات. هدفنا هو تسريع هذه العملية. نمتلك الآن الأدوات التي تلتقط التفاصيل المادية لأي جسم حتى لو بلغت مليارات النقط البيانية، ونهدف لتسهيل عملية التعامل مع هذه البيانات للناس لتُفهَم من وجهة نظر بشرية وتجيب على السؤال: «ما هذا الجسم؟»»

يقول جونزالو: «نستكشف طرقًا جديدة لتصميم وتصنيع الأشياء. بنينا العام الماضي معمل تصنيع بأحدث التقنيات.» وأضاف مازحًا: «الآن نمتلك أكبر مجموعة من الطابعات الثلاثية الأبعاد في ساحل أمريكا الغربي.»

إذا أصبح التقاط تفاصيل التصميم للأجسام المادية عملية سريعة وغير مرهقة، فإن الجميع يمكن أن يصبحوا مصممين. وبمجرد أن تصبح الطباعة الثلاثية الأبعاد تقنية موجودة في كل مكان، فإنه يمكن لأي شخص أن يصبح مُصنِّعًا. قال جونزالو ضاحكًا: «سيصمم ابني ذو الأحد عشر عامًا جسمًا معقدًا كان يستغرق مني ثلاث سنوات لتعلُّم كيفية تصميمه.»

أضاف جونزالو: «الهدف طويل الأمد هو إنتاج مكتبات الأشكال من بيانات السحابات النقطية. هذا جيد بالنسبة إلى الهندسة العكسية، ويسرع من عملية التصميم إذا أردنا نسخ الجسم أو تغييره رقميًّا. باختصار، فإن الجيل التالي من برامج التصميم سيسرع من عملية التقاط تفاصيل الواقع على الكمبيوتر.»

الفصل السابع

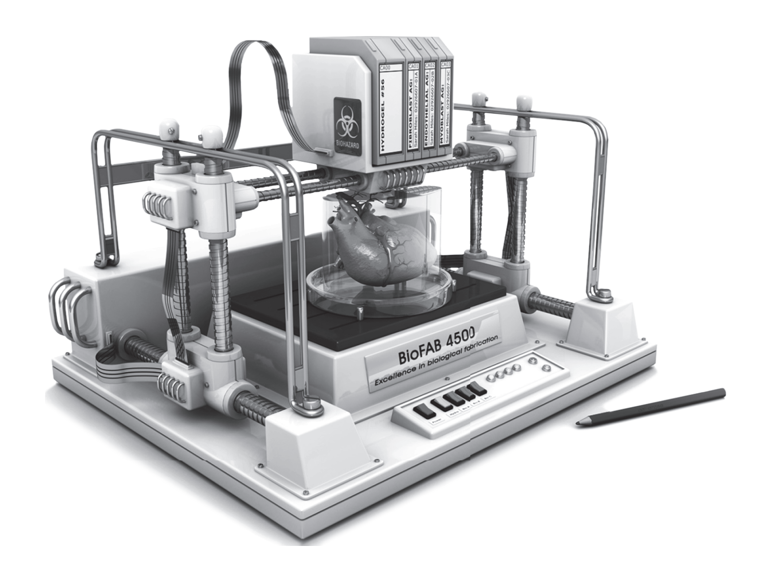
# الطباعة الحيوية بالحبر الحي

أحدثَ باحث في جامعة ويك فورست يُدعى أنتوني أتالا ضجة عندما ظهر في مؤتمر تيد عام ٢٠١١، وقدَّم ما فهمه العديد من الناس — بنحو خطأ — على أنه عرض لكيفية طباعة كُلية بشرية حية؛ وبما أن ٩٠ بالمائة من المرضى على قوائم التبرع بالأعضاء ما زالوا في انتظار زرع الكُلَى، فقد تحمس الكثيرون بطبيعة الحال لما قدمه أتالا، وبعد إزالة الالتباس الناتج، تبين أن طباعة الكُلى الحية بنحو ثلاثي الأبعاد كانت لا تزال في مراحلها البحثية الأولى. كانت «طباعة الكُلى» في الواقع تجرِبة معملية تتضمن طباعة نسيج يشبه الكُلى بنحو ثلاثي الأبعاد قادر على تنقية الدماء وتخفيف البول.

كان للعرض الذي قدمه أتالا في مؤتمر تيد أثر في زيادة وعي الناس بالاحتمالات الملازمة لأعضاء الجسم المطبوعة بنحو ثلاثي الأبعاد. يظل أتالا — وهو أحد المبشرين بالطب التجديدي وأحد الباحثين الرواد في مجال الطباعة الحيوية — متفائلًا؛ ففي مقابلة مع رسالة إخبارية تابعة لإحدى الشركات المالية الكبرى، قال أتالا: «لا شك أنه في أحد الأيام، ربما بعد جيل، يمكن أن تمتلك قلبًا مصنوعًا من نسيج الخلايا خاصتك. أليس هذا رائعًا؟»[1]

## (١) طابعة الشباب

سمَّى وليام شكسبير الشيخوخة «الشتاء البشع». تحكي العديد من الثقافات عن ينبوع الشباب الخيالي الذي يمنح الناس الشباب الدائم، ووصفت رواية ترجع للعصور الوسطى القوة العلاجية للينبوع التي تُحوِّل المحاربين الطاعنين في السن إلى شباب.




الهدف الأساسي للطباعة الحيوية هو طباعة عضو بشري يؤدي وظيفته بنحو ثلاثي الأبعاد من مزيج من الخلايا والمواد الحيوية (الرسم مُهدًى من كريستوفر بارنات، نقلًا عن موقعه ExplainingTheFuture.com، القسم الخاص بمفهوم الطباعة الحيوية (http://explainingthefuture.com)).

> اغتسل المحاربون القدامى في الينبوع، وكانوا أكثر من ستة وأربعين رجلًا، وعندما خرجوا كانوا في الثلاثين من العمر، ويبدون كأفضل الفرسان. ثم تحدَّث الرجال الآخرون المسنِّون فقالوا: «أترَوْن كم نحن طاعنون في السن وظهورنا منحنية؟ لقد عشنا أكثر من مائة عام وسترَوْننا الآن في شكل آخر.» نزل الرجال في الينبوع، واغتسلوا أربع مرات كما نُصِحوا، ثم خرجوا مبتهجين. وعندما عادوا للإسكندر، تعرَّف عليهم بالكاد؛ فقد كانوا شبابًا للغاية.[2]

رغم قرون من البحث، لم يعثر أحدٌ بعدُ على ينبوع الشباب. وفي العصور الحديثة، استمر الناس في سعيهم في البحث عن الشباب بالجراحات التجميلية والمفاصل البديلة وصمامات القلب الجديدة والمكملات الإعجازية من الفيتامينات وكريمات البشرة. وأخيرًا، ربما ستنهي تقنيات الطباعة الثلاثية الأبعاد هذا البحث. ستساعد أجزاء الجسم البديلة المطبوعة حسب الطلب من يحتاجون لزراعة الأعضاء أو يمتلكون مفاصل مؤلمة، وسيتمكن

أصحاب الدخول الكبيرة من طلب أجزاء بديلة مطبوعة حسب مواصفات خاصة مُحسَّنة للقيام بنشاطهم الترفيهي المحبب، وستجاهد اللجنة الأوليمبية في عام ٢٠٧٢ لتقرير إن كان الرياضيون ذوو الأعضاء المطبوعة حيويًّا يجب منعهم من خوض المنافسات.

ما زالت الأعضاء المطبوعة بنحو ثلاثي الأبعاد ضربًا من الخيال، وما زال علم طباعة الأنسجة الحية اليوم في بداية صعوده الطويل لـ «سلم الحياة المطبوع بنحو ثلاثي الأبعاد» الافتراضي.

تخيَّل سلمًا طويلًا من الأعضاء البشرية البديلة المرتبة طبقًا لتعقيد تركيبها. ستقع الأجزاء التعويضية الجامدة في الدرجات السفلى من السلم، وفي الدرجات الوسطى ستقع الأنسجة الحية البسيطة مثل العظام والغضاريف، وفوقها مباشرة ستقع الأوردة والبشرة، وتحت قمة السلم مباشرة ستكون هناك الأعضاء الحيوية المعقدة مثل القلب والكبد والمخ، وأخيرًا، وعلى قمة سلم الحياة، ستكون هناك المخلوقات الحية أو ربما يومًا ما أشكال صناعية للحياة ذات وظائف كاملة. لقد وَضعت تقنية الطباعة الثلاثية الأبعاد قَدَمها اليوم على الدرجات السفلى للسلم التخيلي هذا، وتتطلع إلى الصعود للدرجات الوسطى، وتحلم بالوصول يومًا ما إلى قمة السلم.

## (١-١) طباعة سلم الحياة بنحو ثلاثي الأبعاد

في أحد خطابات التخرج في مدرسة ثانوية بديلاوير، وصف جو بايدن مستقبلًا باهرًا حيث «سنقدر، باستخدام الطابعات الثلاثية الأبعاد، على تجديد الأنسجة الحية بعد إصابة شديدة أو حرق واستعادتها لحالتها الأصلية. إنه قريب جدًّا في واقع الأمر.»[3] مزاعم بايدن الجريئة هي مجرد مزاعم لا أكثر. مع ذلك، فهو ليس مخطئًا تمامًا.

دعونا نبدأ بأسفل السلم؛ أعضاء الجسم البديلة الجامدة مثل تيجان الأسنان أو الأطراف الصناعية. أول موجة من الأعضاء البشرية البديلة المطبوعة بنحو ثلاثي الأبعاد والمتاحة تجاريًّا أصبحت موجودة بالفعل، وتتحرك هنا وهناك داخل أجساد البشر العاديين، وربما حتى داخلك أنت. وتوجد الأعضاء التعويضية غير الحية؛ مثل العظام الصناعية وتيجان الأسنان والعدسات اللاصقة وأجهزة السمع المطبوعة بنحو ثلاثي الأبعاد داخلَ أجسام آلاف البشر حولَ العالم.

يُقدر فيل ريفز، المدير الإداري لشركة إيكونوليست، وهي شركة استشارات خصصت نشاطها لمجال الطباعة الثلاثية الأبعاد، أن اليوم هناك «عشرة ملايين جهاز مطبوع

بنحو ثلاثي الأبعاد لمساعدة ضعاف السمع متداول حول العالم.»[4] وحققت أدوات تقويم إنفيزالاين — وهي مشابك أسنان بلاستيكية شفافة مطبوعة بنحو ثلاثي الأبعاد حسب مواصفات خاصة وتُستخدم لمرة واحدة — نجاحًا تِجاريًّا ضخمًا. وهناك ما يتراوح بين نصف مليون وثلاثة أرباع مليون سن مطبوع بنحو ثلاثي الأبعاد مزروع في أفواه البشر حاليًّا.[5]

ومثل أجزاء الطائرات البديلة المتقدمة المطبوعة من التيتانيوم بنحو ثلاثي الأبعاد، فإن الأجزاء البشرية البديلة المطبوعة بنحو ثلاثي الأبعاد تُمثِّل قمة عالم التصنيع الرقمي المخصص الذي يُنتَج بأعداد قليلة؛ فعملية طباعة الأسنان وأجهزة مساعدة ضعاف السمع وأدوات تقويم الأسنان مماثلة لتلك الخاصة بأجزاء الطائرات؛ يُمسَح عضو الجسم الذي يُراد طباعته ثم تُرسل البيانات لمعمل متخصص حيث تُحوَّل إلى ملف تصميم صالح للاستخدام، ثم تَطبع الطابعة ملف التصميم باستخدام مطاط طري أو خزف صلب ولامع أو بلاستيك مرن شفاف وطري.

اليوم، تُصنع أول موجة من الأعضاء المطبوعة بنحو ثلاثي الأبعاد من مواد خام مفردة مثل المعادن أو الخزف أو البلاستيك. هذه الأعضاء مناسبة للأغراض التِّجارية؛ حيث إن قيمتها في السوق تستند على حقيقة أنها تناسب جسمًا ذا شكل فريد. والشكل المخصص لتلك الأعضاء، وإنتاجها بأعداد منخفضة، وحقيقة أنها لا تقدم لصانعها أي شكل من أشكال اقتصادات الحجم؛ تجعلها مرشحًا مثاليًّا (ومربحًا) للطباعة الثلاثية الأبعاد. ومسألة تخطي العقبات التنظيمية تُعتبر سهلة نسبيًّا؛ فبعكس الأنسجة الحية أو الأدوية، فإن الأعضاء البشرية الجامدة تتضمن مخاطر صحية عاجلة أقل، ويمكن التنبؤ بآثارها الجانبية بنحو أكبر.

ماذا عن طرَف صناعي له جاذبية جنسية؟ اليوم، وطبقًا لاتحاد مبتوري الأطراف الأمريكي، وهو إحدى مجموعات الدعم الوطنية، فإن حوالي مليوني مواطن في الولايات المتحدة لديهم أطراف صناعية، ومعظم الأطراف الصناعية الحديثة لم تتغير بنحو جوهري عن تلك التي كان يستخدمها الجنود العائدون من المعارك المدمرة للحرب العالمية الثانية؛ فاليد الصناعية مصنوعة من المعدِن وقدرتها على الإمساك بالأشياء الصغيرة تتم عن طريق مجموعة من الخطاطيف تشبه الكلاليب.

تعمل شركة بيسبوك إنوفيشانز، وهي شركة صغيرة تقع في سان فرانسيسكو واستحوذت عليها شركة ثري دي سيستمز مؤخرًا، في مجال تصميم أطراف صناعية



هناك حوالي خمسون ألف أداة تقويم أسنان من نوع إنفيزالاين تُطبع بنحو ثلاثي الأبعاد كل يوم (الصورة أُعيدت طباعتها بإذن من شركة ألاين تكنولوجي).

مخصصة وطباعتها بنحو ثلاثي الأبعاد. يقول سكوت سميت، أحد مؤسسي الشركة: «لم تتغير كثيرًا الطريقة التي تُصنع بها معظم الأطراف الصناعية على مدار السنين — تُقص قطعة من الفوم على شكل ساق الشخص ثم يُصنع لها قالب وتُشكَّل.»[6]

يتطور علم صناعة الأطراف الصناعية على نحو كبير بفضل تطور تقنية التصوير التشخيصي الطبي وبرمجيات التصميم والمواد الخام، وتتيح الطباعة الثلاثية الأبعاد لأصحاب الأطراف المبتورة والأطباء مستويات من التخصيص لم تكن متاحة من قبلُ. وتُصمَّم الأطراف الثلاثية الأبعاد الخاصة بشركة بيسبوك لتلائم شكل أجساد من يرتدونها بدقة وأساليب حياتهم وأذواقهم.

تبدأ عملية طباعة الأطراف في بيسبوك بمسح كلٍّ من الساق السليمة للمريض وساقه الصناعية الحالية، ثم تُحول هذه البيانات لملف تصميم إلكتروني، ثم تُوضع صورة الساق السليمة على الصورة الرقمية للساق الصناعية للتأكد من أن الساق الجديدة المخصصة

تعيد لجسد من سيرتديها التناسق. وبعد اختيار العملاء التصميم الفريد خاصتهم، تطبع الشركة الطرَف الصناعي بنحو ثلاثي الأبعاد.



طرف صناعي أنيق المظهر (الصورة مهداة من شركة ثري دي سيسمتز).

تتيح أداة شركة بيسبوك الموجودة عبر موقعها على الإنترنت والمسماة «كونفجيوريتور» للعملاء استكشاف نطاق من أشكال التصميم، يتضمن أشكال السيقان والمواد الخام المستخدمة في التصفيح، وأنماط التشكيل النهائي التي تعطي مرتدي الطرَف نفس الشكل اللافت الذي تثيره دراجة بخارية سريعة ذات تصميم شهير أو وشم فريد. أطلقت الشركة اسم «الإكسسوارات» على الأطراف الصناعية التي تُنتجها تيمُّنًا بأجزاء الزينة المتخصصة المستخدمة على أجسام الدراجات البخارية اللامعة باهظة الثمن.

يصف موقع شركة بيسبوك الإلكتروني ما يقدِّمه كما يلي: «إكسسوارات بيسبوك … لا تعيد فقط الشكل المفقود بل تجلب أيضًا تعبيرًا عن الشخصية والفردية بنحو لم يكن

ممكنًا من قبلُ.» توضح صور الأشخاص الذين يرتدون الأطراف الصناعية المخصصة التي تُنتجها بيسبوك التغير في نظرة الناس للأطراف الصناعية عن الزمن الذي اعتادوا فيه إخفاء ارتدائهم لها؛ فعملاء بيسبوك يرتدون الأطراف الصناعية بكل فخر.

إذا عدنا لسلَّم الحياة المطبوع بنحو ثلاثي الأبعاد وصعدنا درجة أخرى، فسنترك وراءنا الأطراف الصناعية ونصل إلى الدرجة التالية حيث تقع العظام الصناعية المطبوعة بنحو ثلاثي الأبعاد. ما تزال العظام والمفاصل الصناعية المطبوعة بنحو ثلاثي الأبعاد مجالًا طبيًّا استكشافيًّا. وفي وقت كتابة هذا الكتاب، فإن المفاصل الصناعية المصنوعة من التيتانيوم حسب الطلب المطبوعة بنحو ثلاثي الأبعاد متاحة للمرضى المحظوظين (أو الشجعان بما يكفي) لتلقِّي رعاية طبية متطورة و/أو تجريبية.

معظم العظام المستبدَلة المعيارية تُصنع بالقولبة بالحقن إذا كانت مصنوعة من البوليمر، أو تُصَب من المعادن إذا كانت من التيتانيوم. إن نفس القيود التي تنطبق على صناعة أي جزء بلاستيكي أو معدِني لأي آلة تنطبق كذلك على صنع العظام. على سبيل المثال، يجب قولبة الأجزاء العظمية المنفصلة كلٌّ على حدة ثم تجميعها لاحقًا. وتتطلب العظام المقولبة للتوِّ ظروف تبريد محكمة حتى لا تنكمش أو تتشوه وتبقى نظيفة. ويمكن أن يؤدي التبريد الزائد عن الحد في انكسار العظم البلاستيكي حديث الصنع في حين يؤدي التبريد الناقص عن الحد لإنتاج عظام طرية للغاية ستنتشر البقع عليها أثناء الإمساك بها.

حصلت العظام الصناعية المطبوعة من التيتانيوم بنحو ثلاثي الأبعاد على اعتماد الجهات التنظيمية، لكن تلك المطبوعة من البوليمر لم تحصل بعدُ على هذا الاعتماد، وعندما تحصل العظام المطبوعة من البوليمر على هذا الاعتماد، ستتيح احتمالات جديدة لامتلاك البوليمر خصائص خاصة يفتقدها كلٌّ من التيتانيوم والخزف. على سبيل المثال، إن أجزاء العظام المطبوعة من البوليمر والمطبوعة على نحو ثلاثي الأبعاد يمكن أن تُمزج بإضافات حيوية منشطة لنمو العظام ومكونات دوائية فعَّالة مثل المضادات الحيوية ومضادات الالتهابات، ويمكن لرأس الطباعة رش قطيرات من هذه المواد الكيميائية النشطة حيويًّا بدقة لا تُضاهَى.

اكتسبت إحدى الجراحات المثيرة شهرةً حول العالم في عام ٢٠١٢ عندما زرع فريق من الجراحين عظمة مطبوعة من التيتانيوم في فك امرأة بلجيكية تبلغ من العمر ٨٣ عامًا مصابة بسرطان الفم. بدأت العملية بمسح الفريق الطبي لفك المرأة بالأشعة المقطعية،



عظمة فك صناعية «مخبوزة» من مسحوق معدِني (الصورة مهداة من معهد فراونهوفر لتكنولوجيا التصنيع والمواد المتقدمة. توضح الصورة عظمة فك سفلي بشري بهيكل خلوي مُدرَّج كمحاكاة للفك الطبيعي مصنوعة من فوم عظمي معدِني).

وحولت شركة تصميم طبية تُدعى زيلوك ميديكال بيانات الأشعة المقطعية لملف تصميم قابل للطباعة، واستخدمت خوارزميات حاسوبية لإضافة آلاف التجاويف والأخاديد غير المنتظمة لعظمة الفك. بهذه الطريقة فإن أعصاب وعضلات وأوردة المرأة يمكنها الالتئام بنحو سريع مع عظمة الفك الجديدة لدمجها بنحو كامل مع جسدها.

في الخطوة الأخيرة من العملية، طُبعت عظمة الفك المصنوعة من التيتانيوم بواسطة شركة بلجيكية تسمى لاير وايز المتخصصة في التقنيات الحديثة للطباعة الثلاثية الأبعاد للأغراض الطبية. طُبعت عظمة الفك الجديدة الملساء اللامعة المصنوعة من التيتانيوم بتوجيه شعاع الليزر إلى مسحوق التيتانيوم؛ مما أدى إلى دمج ٣ آلاف طبقة أفقية معًا بدقة. وأخيرًا، كُسيت العظمة المطبوعة بالخزف. وبعد الجراحة بساعات، تحدثت المرأة وتناولت الحساء.

## (٢) هندسة الأنسجة

اقتُبست كلمة «ذي أعضاء آلية» على ما يبدو من الدمج بين البيولوجيا والتكنولوجيا، واشتَهَرت هذه الكلمة بسبب مسلسل تلفزيوني من سبعينيات القرن العشرين من بطولة ستيف أوستن يسمى «الرجل ذو الأعضاء الآلية». كما حصلت زوجته «المرأة ذات الأعضاء الآلية» على مسلسلها الخاص المشتق من المسلسل الأصلي، وكانت تظهر على فترات في المسلسل الأصلي.

كان الرجل والمرأة ذوا الأعضاء الآلية في المسلسلين يمتلكان قوًى بشرية خارقة وحواسَّ حادة للغاية بسبب زراعة عدة أعضاء صناعية باهظة للغاية داخل جسديهما. كان الأطفال يختفون من الساحات والملاعب في أوقات اللعب المعتادة أثناء عرض المسلسلين في الدول التي كانت تعرضهما. أتذكَّر أنني ومجموعة من أصدقائي كنا نجري بسرعة بطيئة للغاية، مُصدِرين أصوات نقرات إلكترونية بينما نؤدي حركات بهلوانية مثيرة أو ندبِّر هروبًا جريئًا من وراء خطوط العدو لكل منا.

كانت الأعضاء الآلية تبدو أمرًا واعدًا منذ عدة عقود مضت، لكن في المستقبل، ستصبح فكرة الاستعانة بأعضاء الجسم الآلية أمرًا بدائيًّا؛ فهي معرضة للأعطال وغير قادرة على التطور وقد لا تتلاءم مع الجسم، وستتوافر فيها العيوب التي نجدها في الرُّكب وعظام الورك الصناعية البديلة. في المستقبل، ستُستبدل بالأعضاء الآلية أنسجة مصممة حسب الطلب ومطبوعة بنحو ثلاثي الأبعاد.

إذا كان البلاستيك هو المادة الخام المفضلة في الصناعة، فإن الخلايا الجذعية ستكون هي المادة الخام المفضلة في الطباعة الحيوية. وكلما تطور الطب التجديدي، عاد إلى الطبيعة. ويكمن مستقبل هندسة الأنسجة في طباعة الخلايا الجذعية بنحو ثلاثي الأبعاد بأشكال دقيقة وتركها لتعمل على إنماء الأنسجة الحية.

تُعتبر الخلايا الجذعية الصَّلصال الخام الذي يكوِّن الجسم البشري، وهي أكثر مهارة منا في صنع أعضاء الجسم. والخلايا الجذعية غير متخصصة؛ مما يعني أنها لم تختر بعدُ طريقًا فيما يتعلق بنوع الخلايا الجسدية التي ستصبح عليها، وبما أن الخلايا الجذعية يمكن حثُّها على التحول إلى أي نوع من أنواع الخلايا، التي يصل عددها إلى ٢١٠ والتي توجد في الجسم البشري، فهي ذات أهمية كبيرة من الناحية الطبية.

استُخرجت أولى الخلايا جذعية التي تم التعرف عليها في الثمانينيات من القرن الماضي من أنسجة الأجنة البشرية التي لم تُولد بعدُ؛ مما أدى إلى اندلاع مناقشات عنيفة

حول أخلاقيات مهنة الطب. ومنذ ذلك الحين، استمر الباحثون في اكتشاف المزيد من الخلايا الجذعية، من ضمنها بعض الأنواع المتناثرة في الأجزاء المختلفة للجسم البشري البالغ، والتي تسمَّى الخلايا الجذعية «الجسدية» أو «البالغة». مؤخرًا، اكتُشف أن بعض الخلايا المتمايزة يمكنها الرجوع مرة أخرى إلى حالتها ما قبل التمايز.

طبع جيريمي ماو الأستاذ بجامعة كولومبيا عظامَ ورك جديدة للأرانب في المعمل باذرًا فيها الخلايا الجذعية. في البداية، أزال ماو وفريقُه عظام ورك الأرانب القديمة وصوروها، ثم حوَّلوا هذه الصور لملف تصميم صالح للعمل، وطبعوا الأجزاء البديلة بنحو ثلاثي الأبعاد من عظام صناعية، ثم نثروا الخلايا الجذعية للأرانب على تلك الأجزاء، وأدخلوها جراحيًّا داخل الأرانب. وبعد أربعة أشهر، كانت كل الأرانب تمشي بحرِّية حتى مع زيادة وزن بعضها وتحميلها هذا الوزن الزائد على الأوراك الجديدة بعد بضعة أسابيع من الجراحة.

صمم ماو وفريقه من الباحثين العظام البديلة بقنوات داخلية منحنية متناهية الصغر، سمحت للخلايا الجذعية بالتسلل إلى سطح العظام المزروعة، ومساعدة الأرانب في الشفاء بنحو أسرع. وفي تجارِب أخرى، طبع فريق ماو سنًّا قاطعة لفأر معامل، ونثروا عليها الخلايا الجذعية، وأعادوا زرعها في فك الفأر. وبعد تسعة أسابيع، وبفضل شكل السن المثالي، ودمج الخلايا الجذعية بها، أحاطت العظام والأربطة الجديدة بالسن الصناعية.

في طريقةٍ تُماثل التي يستخدمها فريق ماو في جامعة كولومبيا، طبع الباحثون في جامعة ولاية واشنطن عظمة بنحو ثلاثي الأبعاد باستخدام رذاذ ضبابي نقي مكون من فوسفات الكالسيوم والسيليكون ومسحوق الزنك. صنعت قطيرات الرذاذ النقي طبقات بسمك ٢٠ ميكرونًا (وهو ما يساوي نصف عرض الشعرة البشرية)، ثم نُثرت خلايا عظمية بشرية غير ناضجة على العظمة المطبوعة. نجحت هذه الطريقة حيث نمت الخلايا العظمية غير الناضجة في بيئتها الجديدة، وتحولت في النهاية لأنسجة عظمية حية ناضجة.

## (٢-١) الخلايا الجذعية والحبر الحيوي والورق الحيوي

يعرِّف أحد القواميس الطبية الأنسجة بأنها «تجمُّع لخلايا متخصصة بنحو متماثل تقوم معًا بوظائف خاصة محددة.» تتكون أجسامنا من أنواع مختلفة من الأنسجة، بداية من الأنسجة الدهنية التي تكوِّن خلايانا الدهنية إلى الأنسجة الغضروفية التي تكوِّن

الغضاريف التي تعمل كوسائد لمفاصلنا وحتى الأنسجة العصبية المكونة من شبكات معقدة من الخلايا العصبية المتصلة ببعضها. تحتفظ الأنسجة الرخوة بشكلها بفضل البنية الأساسية الداخلية الداعمة.

عندما ننجح في طباعة خلايا حية وتنميتها لأنسجة حية، سنكون قد نجحنا في الصعود إلى الدرجات العليا للسلم الافتراضي للحياة المطبوع بنحو ثلاثي الأبعاد. إن الطباعة الحيوية الحقيقية، كما نعرِّفها، تصنع أنسجة حية وليس أجزاء بديلة جامدة؛ لأنها تتضمن وضع خلايا حية في المكان المناسب باستخدام طابعة ثلاثية الأبعاد؛ وذلك من أجل صنع أنسجة حية عاملة ومتنوعة الخواص.

يُعرِّف الباحثون «الطباعة الحيوية» بطرق عدَّة، وبتطور المجال، من المحتمل أن تحمل الكلمة المزيد من المعاني. أحد أساليب الطباعة الحيوية يتضمن استخدام «الحبر الحي» وهو جل قابل للطباعة يحتوي على خلايا حية معلقة داخله. هذا الجل الخاص — الذي يسمى الهيدروجيل — يعمل كوسادة وحماية للخلايا الجذعية أثناءَ دفعها خلال رأس الطباعة، وبمجرد طباعة الحبر الحي ووضعه في المكان الصحيح، يحافظ الهيدروجيل على البناء المطلوب للأنسجة. ستفرِز الخلايا الحية مادة داخل الهيدروجيل والتي ستكوِّن في النهاية مصفوفة داعمة. وباستمرار الخلايا الحية في التطور، ستتحول المصفوفة إلى غضاريف أو أي نوع آخر من الأنسجة الحية.

إن ترسيب النوعِ المناسب من الخلايا في مكانه المناسب يشبه نوعًا ما عملية زرع حديقة مثالية من الخَضراوات بوضع كل نوع منها في المكان المناسب له بدقة للحصول على أفضل قدر مناسب من الضوء. لا تشبه الخلايا الجذعية بعضها بعضًا. وحتى الآن، فإن الطبيعة ما زالت أفضل من البشر أو الكمبيوتر في صنع حديقة مثالية من الخلايا الجذعية، الموضوعِ كلٌّ منها في موقعها الدقيق.

أحد أكبر مزايا الطباعة الثلاثية الأبعاد باستخدام الحبر الحي لصنع أنسجة رخوة هي قدرة الطابعة على قذف الخلايا بعناية في أنماط وأشكال دقيقة. وبتحسن الطابعة في الطباعة باستخدام عدة رءوس طباعة، يمكن ملء كل رأس طباعة بنوع مختلف من الخلايا، وستكون النتيجة طباعة فوهة لنوع مختلف من الخلايا، بينما تقوم فوهة أخرى بطباعة الهيدروجيل بخواص مواد مختلفة. وباقتباس فكرة الطباعة الثلاثية الأبعاد بالعديد من المواد الخام وتطبيقها في العالم البيولوجي، يقترب الباحثون خطوات من صنع أنسجة صناعية تحاكي الأشكال المعقدة والهياكل الداخلية والتنوعات الخلوية الموجودة في الطبيعة.

يُمثِّل وضع الخلايا في موقعها المناسب تحديًا، لكن هناك تحديًا آخر؛ وهو التأكد من وضع الخلايا بطريقة تجعلها تكوِّن الشكل المناسب في النهاية. إن موقع الخلايا والشكل الناتج للأنسجة أمران مهمَّان لعمل الأعضاء بالشكل المناسب، كما يمكن لعوامل النمو كذلك أن تُطبع وتُضاف إلى الخليط.

على سبيل المثال، تتطلب أنسجة القلب كثافة مرتفعة من الخلايا لضمان خفَقان القلب بإيقاع منتظم. وإذا لم تكن الخلايا المزروعة فوق هيكل السقالات داخل الأنسجة الصناعية للقلب متصلة فيما بينها بنحو محكم، فإن النتيجة تكون إيقاعًا غير منتظم لدقات القلب. وبما أن تصميم الأنسجة قائم على ملف تصميم إلكتروني، فإن الأنسجة المطبوعة حيويًّا باستخدام الحبر الحي ستخرج دقيقة الصنع، وسيكون تصميمها قابلًا للتكرار.

في النهاية، هناك سر آخر لم ينجح البشر بعدُ في حله هو حقيقة أن الخلايا الحية تحتاج إلى زر «بدء». اليوم، لا يعرف أحد بالضبط كيف يدفع الخلايا المزروعة إلى العمل حتى لو كانت موضوعة في المكان المناسب في سقالات مثالية الشكل. الطبيعة هي من يعرف كيف تدفع الأعضاء إلى العمل، ونحن لا نعرف هذا.

ابتكر باحثون من جامعتَي ميزوري وييل مصطلحي «جسيمات الحبر الحيوي» (وهي أسطح شبه كُروية متعددة الخلايا) و«الورق الحيوي» (الجل المتوافق حيويًّا).[7] في أحد المقالات في مجلة نيتشر، يصف الدكتور جابور فورجاكس، وهو باحث في جامعة ميزوري، أسلوبه الخاص قائلًا: «إنك تمنحنا خلاياك، ونعمل نحن على تنميتها وطباعتها وتشكيل الهيكل، وتصبح الأعضاء جاهزة للعمل.»

استخدم فريقه طابعة ثلاثية الأبعاد مخصصة مصمَّمة في الأساس لصنع أجهزة إلكترونية متناهية الصغر:

> تمتلك الطابعة ثلاث رءوس طباعة، يتحكم فيها جميعًا كمبيوتر موصل بالطابعة، يمكنها وضع أسطح شبه كُروية من الخلايا مثلما تنفث الطابعة المكتبية الحبر.
>
> يطبع رأسان من رءوس الطابعة خلايا الأنسجة (مزيجًا يتضمن، على سبيل المثال، خلايا قلبية وبطانية) بينما يطبع الرأس الثالث ما يملأ الفراغات (مثل الكولاجين) وهو ما يملأ الفراغات بنحو مؤقت حتى تمتزج الخلايا الأخرى. لذا، ولصنع وعاء دموي، على سبيل المثال، توضع خطوط من الخلايا

> مطعَّمة بخطوط من الكولاجين في الفراغات الوسطى، والتي ستُستخلَص لاحقًا لإزاحة الطريق للدم.[8]

لفهم لماذا تمتلك الطباعة الحيوية مثل هذه الإمكانيات، من المفيد مقارنتها باختصار بالطرق السائدة في هندسة الأنسجة.

لعدة عقود، كانت الأنسجة الحية تُصنع على مرحلتين: الأولى هي إعداد سقالات الأنسجة من أحد أنواع المواد المتحللة حيويًّا، ولصنع السقالات المُهندَسة باستخدام الأسلوب التقليدي، يعمد الباحثون إلى تشكيلها بقالب ثم تقطيعها أو استخدام كيماويات لتنظيف سطحها المسامي. أما المرحلة الثانية، فتتمثل في زرع الخلايا الحية داخل السقالات.

قارن هذه العملية بعملية الطباعة الثلاثية الأبعاد للخلايا الحية بأشكال دقيقة، وتركها تكوِّن المصفوفات وفي آخر الأمر السقالات الداعمة لها الخاصة بها. ساعدت الطرق التقليدية لهندسة الأنسجة آلاف المرضى على اكتساب الأنسجة الرخوة التي فقدوها؛ لكن عيوبها كثيرة.

وعن هذه العيوب، يقول باحثون مثل ميجيل كاستيلو وإينيس بيريس وباربرا جوفايا وخورخي رودريجيز:

> تتضمن عيوب هذه الطرق: الاستخدام المكثف لمذيبات عضوية شديدة السُّمِّية، وفترات التصنيع الطويلة، وعمليات تتضمن عمالة مكثفة، والتخلص غير الكامل من المواد الجسيمة المتبقية في مصفوفات البوليمر، وإمكانية التكرار الضعيفة، والمسام غير المنتظمة الأشكال، والترابط الداخلي غير الكافي داخل المسام والهياكل الرفيعة. بالإضافة إلى ذلك، معظم هذه الطرق تفرض قيودًا على التحكم في الشكل.[9]

بمعنًى آخر، فإن السقالات الصناعية المصنوعة بنحو يدوي يمكن أن تتحلل حيويًّا مما يؤدي إلى بعثرة الخلايا والجسيمات بنحو فوضوي. بالإضافة إلى ذلك، فإن الأنسجة المصممة القائمة على سقالات مصممة سلفًا مبذورة بالخلايا الحية ربما لا تلائم النسيج الحي القائم داخل المريض بالفعل بنحو مناسب؛ وبما أن الأنسجة البشرية تتخذ أشكالًا كثيرة متباينة ومعقدة، فيمكن أن يكون من الصعب بناء سقالات للأنسجة لها نفس شكل المحيط الخارجي بدقة. وأخيرًا، وفضلًا عن كل ما سبق، فمن الصعب للغاية بذر أنواع مختلفة من الخلايا داخل سقالة موجودة بالفعل.

## (٢-٢) طباعة الغضاريف الحية

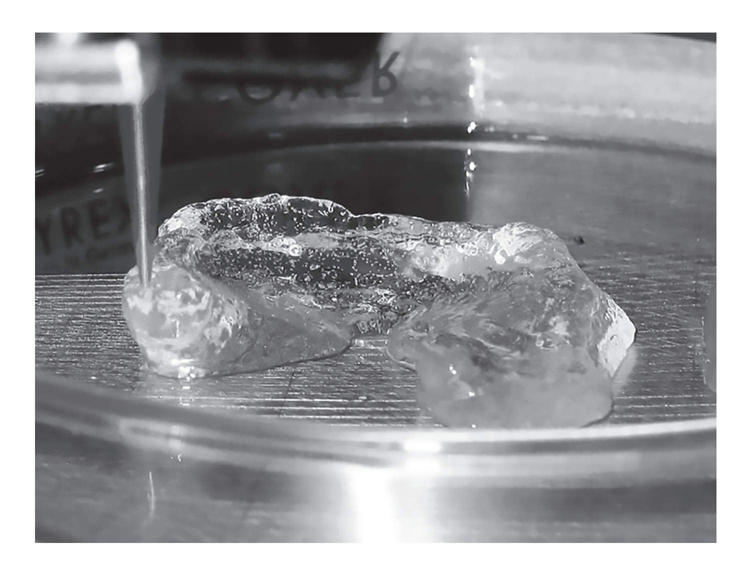
تُعتبر الغضاريف مثالًا شهيرًا على قدرة الطبيعة على هندسة الأنسجة. داخل الجسم البشري، تمتلك الغضاريف قدرة مدهشة على الحفاظ على شكلها لسنوات، أو لتحمل سنوات طويلة من الجهد، عندما تعمل كوسائد للمفاصل. وهناك طبقة حامية من الغضاريف المَفصِلية تعمل كوسائد لمفاصل الركبة، وتجعل حركتها ناعمة وسلسة؛ مما يمنع العظام من الاحتكاك ببعضها. إن الغضاريف هي ما تجعل آذاننا وأنوفنا قابلة للثني ومرنة أثناء قرصها.

ومثل العظام، فإن أنسجة الغضاريف هي أنسجة بسيطة مصنوعة من بضعة أنواع فقط من الخلايا، ولا تحوي أي أوردة، وغرضها بسيط نسبيًّا. كما أن الغضاريف لا يجب عليها هضم الطعام أو إطاعة أوامر الخلايا العصبية أو الاستجابة السريعة للظروف الخارجية. مع ذلك، فإنه حتى تصنيع نسيج بسيط نسبيًّا مثل الغضاريف ما زال أمرًا لم يستطع الطب القيام به على نحو مناسب.

تُعتبر الغضاريف نسيجًا أساسيًّا للجسم لكن لسوء الحظ فإننا اليوم لا نمتلك طريقة صالحة للتطبيق لصنع غضاريف بديلة، فإذا كنت قد مارست رياضة الإسكواش لسنوات أو كنت عدَّاءً متخصصًا في المسافات الطويلة، فأنت تعرف بالفعل أنه بمجرد أن تَبلَى الغضاريف المَفصِلية، فقد ضاعت للأبد. وغياب تلك الغضاريف بين المفاصل يمكن أن يكون مدمِّرًا ومسببًا للآلام والتهاب المفاصل لدى ملايين البشر الذين يعانون من مشكلات في الرُّكب والمرافق وتيبس في عظام الورك والأصابع.

تُعد الطباعة الثلاثية الأبعاد طريقة واعدة لصنع الغضاريف البديلة. في جامعة كورنيل، شاركت داني كوهين ولاري بوناسار في طباعة غضروف هلالي مَفصِلي لخروف. في البداية أخذنا أشعة مقطعية لركبة الخروف وحولناها إلى ملف تصميم، بعد ذلك، استخرجنا خلايا حية من جسد الخروف وخلطناها بهيدروجيل طبي. وأخيرًا، ضغطنا هذا المزيج في رأس طباعة ثلاثية الأبعاد، وفي هذه الحالة، يكون محقنًا. في مشروع بحثي لاحق، طبع لاري بوناسار غضروفًا لأذن بشرية بنحو ثلاثي الأبعاد بِناءً على ملف تصميم نتج عن بيانات لمسح ضوئي لأذن خارجية.

لا يوجد ما هو بسيط بشأن الجسم البشري، ويظل صنع ولو أنسجة بسيطة مثل الغضاريف عملية معقدة. وعلى الرغم من أنه من الممكن طبع غضاريف حية بنحو ثلاثي الأبعاد، فإن النجاح في ذلك يُمثِّل نصف المعركة فقط؛ فنحن لم نحلَّ بعدُ



طبعنا غضروفًا هلاليًّا صناعيًّا باستخدام خلايا حية من جسم خروف. كان ملف التصميم عبارة عن أشعة مقطعية. ازدهرت الخلايا المطبوعة في بيئتها الجديدة لكن لم يُزرع الغضروف الصناعي على الإطلاق (الصورة مهداة من دانيال كوهين ولاري بوناسار).

التحدي الثاني المهم، وهو أن مفاصلنا صُممت لتلقِّي الجهد القاسي. تحتاج الغضاريف الصناعية لتصليبها وتهيئتها قبل أن تصبح جاهزة لزرعها في جسد أي شخص؛ لهذا، فإن الغضاريف المصنَّعة في معامل الأبحاث يجب أن تخضع للضغط الميكانيكي قبل زراعتها.

ومثل طفل مدلل محمي من بيئته، فإن الغضاريف الصناعية التي تمتعت بالحياة المرفهة داخل طبق بتري محمي لم تواجه واقع حياة الجهد القاسي. وفي غياب الضواغط الخارجية مثل أميال من السباحة أو مباريات التنس المرهقة، تبقى الغضاريف الصناعية ضعيفة وليِّنة. وإذا زُرعت الغضاريف الصناعية في ركبة من دون معالجتها، فستنسحق لتصبح لا شيء. عندما عرضت أنا وداني ولاري أول مجموعة من غضاريف الخروف المطبوعة على مجموعة من الجراحين الممارسين، طلبوا منا مغادرة الغرفة فورًا بمجرد أن اكتشفوا أنها ضعيفة للغاية لدرجة أنها لا تحتمل أبسط خيوط الجراحة.

يبحث الباحثون عن حلول لهذه المشكلة. إحدى الطرق الواعدة هي وضع الأنسجة الصناعية داخل مفاعل حيوي لمحاكاة الطريقة التي تنضج بها الأنسجة الحقيقية التي تنضج بالمجهود، ولإعداد الغضاريف المطبوعة حيويًّا للاستخدام الواقعي، فربما يكمن الحل في تطوير المواد الخام المكونة للهيدروجيل. أحد الحلول الأخرى الممكنة ربما يكون التطبيق المبتكر لمصادر ضغط أخرى (مثل الضوء أو الحرارة أو الاهتزازات الصوتية) لإعداد تلك الغضاريف المطبوعة لما سيأتي. نعم، حتى الغضاريف تحتاج إلى الحب القاسي.

### (٢-٣) طباعة صمامات القلب

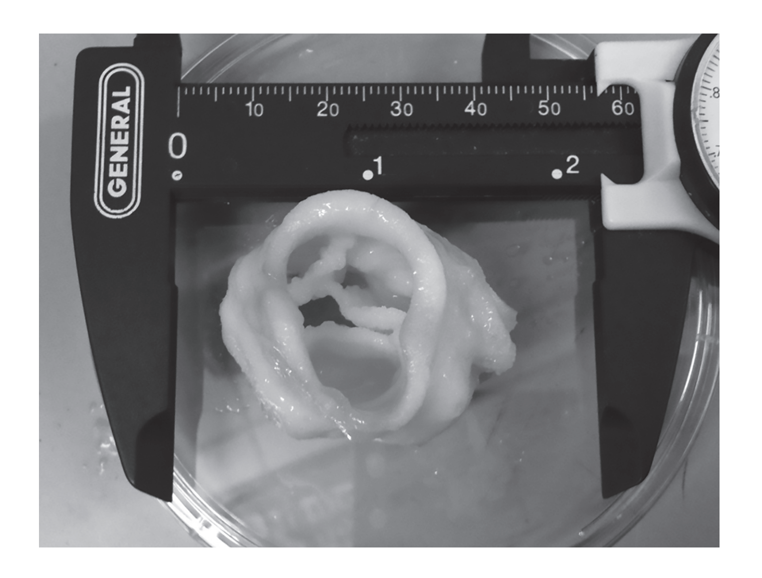
ربما تكون الغضاريف نوعًا أبسط نسبيًّا من الأنسجة الحية لكن هناك بعضها أكثر تعقيدًا وأهمية من غيرها. على سبيل المثال، إذا تلفَت الغضاريف في رُكبتك أو مَرفِقك، فستستمر في البقاء حيًّا (رغم أنك ستكون عاجزًا عن الحركة، وستظل تشعر بالألم). لكن إذا كانت الغضاريف في صمامات قلبك لا تعمل كما يجب، فإن مخاطر الموت بأحد الأمراض القلبية الوعائية تزيد بنسبة ٥٠ بالمائة.

لا يوجد عضو في الجسم أخطر في مَهمته من القلب؛ فهو مصنوع من العضلات والأوعية الدموية والغضاريف، التي تعمل كوحدة واحدة في روتين معقد تصنعه النبضات الكهربائية التي تسري في الجسد. والقلب البشري ينبض في المتوسط مائة ألف مرة يوميًّا تقريبًا. في الحقيقة، فإن نسيج القلب يحتمل النوع الخاص به من الجهد بمتوسط يصل إلى ٨٠ مليون نبضة في السنة، وحوالي خمسة إلى ستة مليارات نبضة في حياة المرء.

أحد أكثر الأجزاء الطبية المعضلة المتعلقة بالقلب هي صماماته الرفيعة الليفية. يمتلك القلب البشري أربع غرف تفصل بينها صمامات تشبه بوابات باتجاه واحد، تفتح ثم تغلق في وقت محدد بدقة للتحكم في اتجاه تدفق الدم الذي يُضخ من غرفة لغرفة. وإذا لم تعمل هذه الصمامات بالشكل المناسب، فسيتوقف القلب عن أداء وظيفته في النهاية. تقول تقارير جمعية القلب الأمريكية إن خمسة ملايين أمريكي كل عام يكتشفون أنهم مصابون بمشكلات في صمامات القلب، كما تُعتبر صمامات القلب المعيبة عيبًا خِلقيًّا شائعًا.

تتسم صمامات القلب بصغر الحجم حيث يبلغ حجمها ما بين القطعة المعدِنية فئة العشرة سنتات في المواليد الجدد وتلك الخاصة بربع الدولار في البشر الناضجين. ويجب على تدفق الدم أن ينبض بقوة في اتجاه واحد فقط، وإذا كان صمام القلب غير مناسب ميكانيكيًّا، فسيبدأ في تسريب الدم ببطء؛ مثل موظف غير كفء في شركة سيتسبب عمله

الرديء في النهاية في تدهور عمل وحدات عمل عالية الأداء. ويمكن للصمامات أيضًا إيقاف القلب عن العمل إذا أصبحت سميكة أو متيبسة.




صمام قلب صناعي مطبوع بنحو ثلاثي الأبعاد (الصورة مهداة من جوناثان بوتشر من جامعة كورنيل).

ربما تُوفِّر الصمامات المطبوعة بنحو ثلاثي الأبعاد حلًّا يومًا ما. يُعتبر جوناثان بوتشر، الأستاذ في جامعة كورنيل، أحد الباحثين الروَّاد في مجال الهندسة الحيوية لصمامات القلب الصناعية. زرتُ جوناثان في قسم الهندسة الحيوية في جامعة كورنيل الذي يقع داخل مبنًى رخامي أبيض حديث. وداخل المبنى، كانت الأرضيات الحجرية الباردة جدًّا تُضخم صدى الخطوات. فيما عدا ذلك، كان كل شيء يتسم بالهدوء. كان دهليز منطقة استقبال الزوار الشبيه بصندوق كبير ضخمًا للغاية؛ مما يجعل من بداخله يبدون كأقزام.

كان مكتب جوناثان على العكس تمامًا من البيئة المقفرة التي يتردد فيها صدى الصوت خارجه. وساهمت لوحتان زيتيتان زاهيتا الألوان في بث الدفء في المكتب، وقد كانتا هدية من طالبة من إحدى الفرق التي يُدرس لها جوناثان. أخبرني جوناثان

قائلًا: «لقد رَسَمَت زيتيًّا بعض القلوب التي استخرجتها من أجنة الدجاج وهي في مراحل التطور المختلفة.» طلبتُ منه تفسيره للتحدي الذي تمثله صمامات القلب اليوم. قال: «اليوم، يستبدل الجراحون صمامات القلب بطريقة من اثنتين: صمامات القلب الميكانيكية أو الصمامات المأخوذة من الأبقار أو الخنازير التي تُنظف وتُعالج مثل قطعة طرية من الجلد الصناعي.»

تعاني الصمامات الموجودة حاليًّا — سواء الميكانيكية أو المأخوذة من الحيوانات — من عيوب خطيرة. الجانب الإيجابي لصمامات القلب الميكانيكية هو أنها تدوم لوقت طويل بعد زرعها. لكن يمكن أن تُحدث جلطة دموية تنتقل إلى المخ. وهذا ما يجعل أصحاب تلك الصمامات يتناولون أدوية مضادة للتجلط ما يسبب سلسلة أخرى من التحديات الطبية، وكذلك قيودًا وظيفية وحياتية.

لا تتطلب الصمامات المنقولة من الحيوانات، وعادةً ما تكون الخنازير، مضادات تجلط لكنها لا تدوم طويلًا؛ فهي ليست قوية بما يكفي للبقاء لفترة طويلة داخل الأجسام النشيطة للمرضى الشباب. وأخيرًا، فإنه لا يمكن للصمامات التعويضية، سواء أكانت ميكانيكية أو مشتقة من الحيوانات، النمو بنفس معدل الجسم المُضيف لها؛ مما يتطلب من أصحابها الخضوع لجراحات قلب مفتوح متكررة لزرع صمامات أكبر.

يوضح جوناثان أن الجراحين يومًا ما سينقذون حياة البشر باتباع أسلوب جديد تمامًا، وهو: الطباعة الثلاثية الأبعاد لصمامات قلب جديدة تُزرع مباشرة في جسد طفل يافع يعاني من عيب خِلقي. ويعتقد جوناثان أن جزءًا هامًّا من هذا الحل يكمن في فك غموض كيف تتطور الخلايا الجذعية داخل الجنين لتصبح خلايا ناضجة تكوِّن صمامات القلب. وإذا تمكن جوناثان من اكتساب معرفة عميقة فيما يتعلق بعملية النضوج هذه، فهو يعتقد أنه سيقترب خطوة من الطباعة الحيوية لصمامات القلب الصناعية مكتملة الوظائف.

يهدف بحث جوناثان إلى فك شفرة ثلاثة أجزاء من لغز الطباعة الحيوية. أولًا: يحاول حل مشكلة الحب القاسي. يرجع هذا إلى أن صمامات القلب المطبوعة، مثلها مثل الغضاريف المَفصِلية، تحتاج إلى التعرض للجهد القاسي داخل حاضنة تسمى المفاعل الحيوي لكي تعمل على نحو ملائم.

يعمل جوناثان على طرق لرفع جودة الطباعة الحيوية لعدة أنواع من الخلايا الجذعية في عملية طباعة واحدة. ولمحاكاة قدرة الطبيعة على مزج أنواع الخلايا المختلفة في أنماط دقيقة تؤدي وظائف مهمة، يطبع جوناثان باستخدام الحبر الحي بنحو ثلاثي الأبعاد عن

طريق فوهات طباعة عديدة في نفس المرة. ولطباعة الخلايا الجذعية من أنواع مختلفة في مرة واحدة، أدخل جوناثان تعديلات على طابعة فاب آت هوم الحيوية باستخدام العديد من المحاقن.

وأخيرًا، وبما أن الطباعة الحيوية بطبيعة الحال هي طباعة باستخدام العديد من المواد الخام، يعكف جوناثان على تطوير برنامج يمكنه تصميم حركات العديد من رءوس الطباعة التي يحوي كلٌّ منها نوعًا مختلفًا من الخلايا. يقول جوناثان: «يمكن لأي طابعة ثلاثية الأبعاد اتباع تعليمات من ملف تصميم لطباعة نوع واحد فقط من الخلايا؛ لذا كان علينا ابتكار خوارزمية برمجية لتمكين ملف تصميم واحد من إدارة طابعة ثلاثية الأبعاد ذات فوهات عديدة لطباعة أنواع مختلفة من الخلايا في وقت واحد.»

يتوجه معظم تركيز جوناثان إلى تحديد الشكل المثالي لترسيب الخلايا الجذعية المطبوعة حيويًّا، وبما أن الخلايا المكونة لصمام القلب يجب أن تكون مُجمعة بكثافة في موضع محدد للقيام بوظيفتها، فإن وضع الخلايا في المكان الصحيح أمرٌ مهم للغاية. تشبه الخلايا الجذعية موظفين مجتهدين عاملين بتوجيه ذاتي، يحتاجون فقط النوع المناسب من بيئة العمل. يفسر جوناثان هذا قائلًا: «انظر إلى الخلية الجذعية على أنها نحلة شغالة، إذا أمكنك العثور على طريقة لطباعة أنواع معينة من الخلايا الجذعية في الموقع المناسب على النسيج المصمم، فالأمر يشبه دخول خلية جذعية لمكتب فارغ لتبدأ في البحث عما يمكن أن تقوم به.»

وباستمرار باحثين مثل جوناثان في الكشف عن أسرار الطباعة الثلاثية الأبعاد للأنسجة الحية؛ فالأمل يزيد في تقليل مخاطر زراعة الأعضاء يومًا ما. وأفضل ما يتعلق بالطباعة الثلاثية الأبعاد للخلايا الجذعية المأخوذة من جسد المريض هو أن نظام المناعة خاصته من المرجَّح أن يقبل العضو البديل المطبوع بنحو أكبر، كما أن الأدوية الكابحة للمناعة، مثلها مثل مضادات التجلط التي يستخدمها المرضى الحاصلون على صمامات بديلة، تؤدي إلى حدوث سلسلة متتالية من الآثار الجانبية السلبية. هذا بالإضافة إلى أن الصمامات المطبوعة من الخلايا الجذعية للطفل يمكنها النمو بمعدل نمو جسده وترميم نفسها.

## (٣) برامج التصميم بمساعدة الكمبيوتر الخاصة بالجسم البشري

مهما كانت مهارة المصمم، فمن المستحيل تشغيل الكمبيوتر واختيار برنامج للتصميم بمساعدة الكمبيوتر خاص بالجسم البشري. على الرغم من أن بعض أنواع البرامج الجديدة

آخذة في التطور في هذا الاتجاه، فإننا ما زلنا على بُعد سنوات عديدة من أن نصبح، على سبيل المثال، قادرين على تصميم ركبة جديدة مُحسَّنة من أجل لاعبة تايكوندو حاصلة على الحزام الأسود ويبلغ طولها ٥ أقدام و١٠ بوصات وتزن ١٤٥ رطلًا، ومعرَّضة للإصابة بإصابات متكررة في الرباط الأوسط للركبة اليمنى.

تشكلت برامج التصميم التِّجارية من خلال أصولها: الهندسة (تصميم المنتج) أو الرسوم (الرسوم المتحركة أو ألعاب الفيديو). أحد الأسباب لوجود القيود الحالية المتأصلة في برامج التصميم هي حقيقة أنه لوقت قريب كان القليل من الناس فقط يتخيلون أننا سنحتاج يومًا لبرامج التصميم بمساعدة الكمبيوتر لتصميم أجزاء الجسم البشري. وإذا فكرت في الأمر، فستجد أن تصنيع أجزاء جديدة من الجسد من المحتمل أن يتبع عملية تصميم مشابهة لتصنيع أجزاء بديلة جديدة للآلات أو تصميم فيلم رسوم متحركة جديد.

في بحثي عن مزيدٍ من المعرفة عن برامج التصميم بالكمبيوتر الخاصة بأعضاء الجسد البشري، اتجهتُ غربًا إلى جامعة يوتا، وهي جامعة بحثية على مستوًى عالمي، تقع في موقع بعيد، لكنه من أكثر المواقع الجغرافية جمالًا وفتنة على مستوى العالم. لعقود، كانت الجامعة مركزًا للابتكار في مجال التصوير الرقمي. تضم قائمة خريجي الجامعة مشاهير عالم تصميم الرسوم في العالم: جون وارنوك، أحد مؤسسي شركة أدوبي؛ وإيد كاتمول، مؤسس استديوهات بيكسار لأفلام الرسوم المتحركة؛ وجيم كلارك، مؤسس شركة سيليكون جرافيكس ولاحقًا شركة نتسكيب. وخريج آخر هو نولان بوشنيل، مؤسس بونج، إحدى أولى ألعاب الفيديو الناجحة تِجاريًّا، والتي صممها أثناء عمله في شركة أتاري.

يقع حرم الجامعة في مدينة سولت ليك سيتي في حِضن فجوة على شكل فوهة بركان عملاقة محاطة بقمم جبلية مسنَّنة تتوهج بلون أبيض في الشتاء وتومض بأوراق خضراء وارفة في الصيف. وبالنسبة إلى شخص مثلي اعتاد المناظر الطبيعية الأقل جمالًا وتأثيرًا للساحل الشرقي للولايات المتحدة، فإن تلك المدينة كانت تشبه وجه القمر. ومثل محطة بحوث على سطح القمر بملايين الدولارات، فإن معهد التصوير والحوسبة العلمية ذا الشهرة العالمية، والذي أُسس عام ١٩٩٤، كان يقبع في فخر على طرَف الحرم الجامعي، وتطل نوافذه على حافَة قمم الجبال المسنَّنة المحيطة به.

تهدف الأبحاث في هذا المعهد لتلاقي مجالات التصوير التشخيصي الطبي والتصوُّر العلمي والحوسبة العلمية وبحوث البيانات الضخمة. هناك شيء في الهواء في ولاية يوتا يمنح شعورًا بأن كل شيء ممكن الحدوث. الولاية مأهولة بالقليل من السكان، وتُعتبر جَنة

لهواة التزلج والسفر، وموطن العديد من الحدائق الوطنية وسلسلة من الطرق السريعة ذات المناظر الطبيعية التي تشق مساحات رائعة من البراريِّ.

في مكتب هادئ ذي نوافذ تزيِّن زهور الأركيد الجزء الداخلي منها، جلستُ مع كريس جونسون المدير المؤسس للمعهد، وكان هادئًا ومتأنيًا. لا يوحي سلوك كريس الهادئ والمتأدب بأنه فاز بعدة جوائز على مر السنوات بسبب عمله في التصوير والحوسبة الطبية الحيوية، ومنها مؤخرًا جائزة تشارلز بابيدج التي تمنحها جمعية معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات، والتي تعادل جائزة الأوسكار، عن مجمل الأعمال لكن في مجال الحوسبة. وعلى الرغم من ظهوري المفاجئ في المكتب الذي يستقبل فيه الزوار في المعهد، فقد كان مضيافًا، واستغرق الوقت الكافي لإعطائي جولة وافية في المبنى الجديد اللامع للمعهد والمكون من أربعة طوابق.

سألت كريس سؤالًا أساسيًّا: «هل سيكون ممكنًا في يوم من الأيام وجود برنامج تصميم تِجاري لتصميم وتطوير الأعضاء البشرية؟» رد قائلًا: «ربما.»

فسَّر كريس كلامه قائلًا: «حاليًّا الجسم البشري معقد للغاية من الناحية الهندسية، ونماذج برامج التصميم بمساعدة الكمبيوتر تقوم على الأشكال الهندسية المنتظمة.» ترجمة ما قال كريس هي أن أجسامنا معقدة للغاية ومصنوعة من نطاق عريض من المواد والأنسجة المشكلة بدقة والعظام والأوعية الدموية؛ مما يجعل من المستحيل حاليًّا التقاط ما يكفي من التفاصيل بنحو رقمي بالبرامج والمكونات المادية الموجودة حاليًّا من أجل طباعة أعضاء حية حقيقية بنحو ثلاثي الأبعاد.

يتخيل كريس ما يسميه «الاندماج الكبير» بين التصوير التشخيصي الطبي والبيانات الضخمة وتحريك ألعاب الفيديو وبرامج التصميم بمساعدة الكمبيوتر التقليدية. يستكشف الباحثون في المعهد — من بين أمور أخرى — كيفية التقاط ومحاكاة الجسم البشري بنحو رقمي وتطوير البرامج التي ستلعب يومًا ما دورًا مهمًّا في تطوير الطباعة الثلاثية الأبعاد للأنسجة الحية. باحثون آخرون يطورون خوارزميات حاسوبية يمكنها بكل مهارة الربط بين قطاعات عرضية خضعت للمسح الضوئي من العضو التالف لتكوين نموذج حاسوبي ثلاثي الأبعاد. والتحدي الكبير المستمر هو كيفية الإدارة الفعالة للكَميات الهائلة من البيانات التي تولدها عملية التصوير التشخيصي الطبي.

في صناعة الحوسبة الكبرى، يقطع مصممو ألعاب الفيديو التِّجارية خطوات واسعة في عملية التقاط تفاصيل الأسطح وفهم كيفية تصوير حركات أجسامنا رسوميًّا. والمؤسسة

الطبية تحقِّق تقدمًا في التقاط المزيد من التفاصيل الرقمية الدقيقة للأجزاء الداخلية لأجسامنا. ويصمم العلماء الأكاديميون خوارزميات أقوى من ذي قبل لنمذجة البيانات المجمعة من أنظمة حيوية والتنبؤ بها وتحليلها.

لن تصبح الطباعة الحيوية الحقيقية — أي تصميم وتحرير الأنسجة الحية وأعضاء الجسم — واقعًا حتى توجد برامج تصميم بمساعدة الكمبيوتر للجسم قابلة للاستعمال بالفعل؛ فيمكن للتصوير التشخيصي الطبي — وهو أداة قوية — فقط تكوين ملف تصميم من عضو موجود بالفعل. لكن ليس هناك أي برنامج يمكنه تمكين محترف ماهر في مجال الطب من تصميم قلب جديد تمامًا من البداية أو حتى تحرير قلب مصمم بالفعل.

المشكلة في الجسم البشري هي أنه غير منتظم الشكل؛ فأجسامنا تُعَد معجزات فيما يتعلق بالتعقيدات الهندسية، وكل منا يمتلك شكلَ جسد متفردًا يمتلك الكثير من المنحنيات الخارجية وأنواع الخلايا المختلفة وملايين التفاصيل الصغيرة جدًّا. وبتعمقنا أكثر داخل الجسم البشري، تقبع أرض العجائب الحيوية تحت الجلد البشري، وتضاهي في تعقيدها المجرة التي تزخر بالأسرار الغامضة.

أجسامنا تتغير باستمرار؛ فهي مزاجية وتتعرض لحالات من التدفق المستمر المتغيرة دائمًا؛ استجابةً للتغيرات في بيئتنا وعواطفنا وما نأكله. وتنمو ملايين الخلايا وتلتئم وتتغير يوميًّا بطرق غامضة لم نفهمها بنحو كامل بعدُ، وترسل بعض الخلايا إشارات إلى بعضها بطرق لم نفكَّ شفرتها بعدُ.

ستمهد التطورات في برامج التصميم التقليدية والتصوير الطبي وتحليل البيانات الطريقَ للطباعة الثلاثية الأبعاد للأعضاء البديلة للكائنات الحية. لكن هل سنرى قريبًا برامج تصميم تِجارية لهذه الأعضاء البديلة؟ ليس بعدُ؛ لكننا نقترب من تحقيق هذا بمسافة ضئيلة كلَّ عام. قال كريس مازحًا: «أرى تلاقيًا بين عالم برامج المحاكاة والتصوير الطبي وأنظمة التصميم بمساعدة الكمبيوتر. سيؤدي هذا إلى تخصيص مجال الطب لنا، وهو أمرٌ جيد إذا كنت تخطط للحصول على أعضاء بديلة في المستقبل.»

في تصميم المنتجات على المستوى الصناعي، يتعلم المصممون أنه بينما تتطور أدوات التصميم خاصتهم، فإن الطبيعة تصبح مصدرًا مفيدًا للإلهام بنحو متزايد. وفي تصميم أعضاء الجسم البشري، سيكون الأمر مماثلًا؛ فالكائنات الحية هي نتاج ملايين السنوات من دورات التصميم المتكررة التي لا ترحم. تقول جانين بينيوس، مؤلفة ومصممة صاحبة

رؤية: «لقد اكتشفنا مرة تلو الأخرى أن المحاكاة الحيوية مفيدة؛ لأنها تتيح استراتيجية للتحول والتبدل لنوعنا، وهي طريقة عملية لنا للتأقلم والازدهار على هذا الكوكب بمحاكاة ٣,٨ مليار عام من التصميمات والاستراتيجيات الذكية.»[10]

## (٣-١) ظلال الرمادي: التقاط صور لداخل الجسم البشري

إذا لم يكن هناك برامج تصميم للأعضاء البشرية، فكيف يمكن للناس اليوم طباعة الأسنان والعظام البديلة؟ كيف يمكن للجراحين الذين زرعوا فك التيتانيوم طباعة الشكل الدقيق للفك البديل بنحو ثلاثي الأبعاد؟ الأمر بسيط؛ لقد مسحوا جسد المريض بالأشعة المقطعية، وحولوا بيانات الأشعة لملف، ثم حولوا ملف صورة الأشعة لصيغة ملفات يمكنها إرشاد الطابعة الثلاثية الأبعاد.

إن تقنية التصوير الطبي، المدفوعة بالتزايد المستمر في قدرة أجهزة الكمبيوتر وخوارزميات الرسوم الحديثة، أتاحت لنا النظر داخلَ أجسامنا بنحو أعمق من ذي قبلُ. يتجاوز المسح الطبي السطح الخارجي، ويتيح نظرة عميقة داخل أي عضو لتصوير أنسجته الرخوة والصلبة والتجاويف والتمزقات والانسدادات. وترسل الأشعة السينية، وهي أقدم وأكثر طرق التصوير الطبي انتشارًا، شعاعًا كهرومغناطيسيًّا خلال الجسم.

تُعتبر الأشعة فوق الصوتية طريقة أخرى شائعة الاستخدام للتصوير التشخيصي الطبي، وتعمل هذه الطريقة مثل الوَطواط الذي يستكشف طريقه خلال الظلام بإصدار موجات صوتية ترتد عن الأنسجة وتعطي معلومات عن تفاصيل أشكالها وأسطحها. وإحدى التقنيات الأخرى المستخدمة على نطاق واسع في التصوير الطبي هي التصوير بالرنين المغناطيسي التي تُمغنط البروتونات داخل جزئيات الماء بالجسم، وتحول الذبذبات الناتجة إلى صور عالية الدقة للأعضاء والأنسجة الرخوة. هناك تقنية تصوير طبي أخرى تسمَّى التصوير المقطعي بالإصدار البوزيتروني، وتعمل باكتشاف أشعة جاما من مادة مشعة تُبلع أو تُحقن في جسد المريض ثم تُلتقط بكاميرات أشعة جاما.

إذا شاهدت من قبلُ أي فيلم جريمة طبية أو تصفحت صور أشعة الرنين المغناطيسي أو الأشعة المقطعية خاصتك، فربما تكون قد لاحظت أن صور الأشعة الطبية ليست صورة واحدة بل تتكون من عشرات الصور كلٌّ منها تصوِّر قطاعًا عرضيًّا من الجسم بمِئات الظلال للون الرَّمادي. تبدو العظام بيضاء، وتشبه الأنسجة الرخوة تنوعات الألوان الخفية في سماء يومٍ ملبَّد بالغيوم، وتظهر الفجوات — مثل الأجزاء الداخلية للرئة — على هيئة أشكال مسطحة سوداء.

في أي صورة أشعة طبية، تظهر أنواع الخلايا المختلفة التي تتشارك نفس الكثافة المادية كظلال رَمادية شبه متطابقة. تُعتبر هذه الظلال الرَّمادية المحيرة عقبة كبرى أمام تحويل بيانات الصورة لنموذج كمبيوتر ثلاثي الأبعاد يمكن طباعته بنحو ثلاثي الأبعاد. بنحوٍ ما، هذه الظلال الرَّمادية الخفية لأي صورة أشعة طبية يجب فك شفرتها حتى يمكن تحويلها إلى ملف تصميم إلكتروني.

التدرج من الأبيض للرَّمادي للأسود لا يوفر معلومات كافية لإرشاد طابعة ثلاثية الأبعاد، خلال عملية صنع عضو معقد يتضمن أنواع خلايا متعددة، بمظهر متشابه بطريقة محيرة. تزيد مهارة أجهزة الكمبيوتر في التعرف على الأنماط الخفية حتى في أقل تدُّرجات الألوان في صور الأشعة؛ ولذا هناك الكثير من الأمل، ويبقى تحويل الصور المتدرجة رَماديًّا لبيانات رقمية مفيدة وواضحة مساحة كبرى لبحوث التصوير الطبي. لكن على الرغم من هذه العيوب، فإن الباحثين في مجال الطب والجراحين في طريقهم للطباعة الثلاثية الأبعاد لتشكيلة مدهشة من الأعضاء البديلة والنماذج الجراحية الدقيقة والمليئة بالتفاصيل.

## (٤) المستقبل

هناك الآلاف ممن يحتاجون إلى أعضاء بديلة جديدة لأجسامهم إذا توقفت نظيراتها الطبيعية بسبب مرض أو عيب خِلقي أو حادث ما، كما أن خمسين بالمائة ممن تجاوزوا الخمسين من العمر قد يحتاجون إلى قرص صناعي بديل بين الفقرات. وعلى الرغم من الطلب الكبير على تلك الأعضاء البديلة، فإنه يصعب العثور عليها وتتكلف كثيرًا، وطبقًا للشبكة المتحدة لمشاركة الأعضاء، فإن نسبة واحد إلى اثنين فقط من الأمريكيين يموتون بطريقة تجعلهم مناسبين للتبرع بالأعضاء.[11] حتى ستيف جوبز، الذي كان أحد أغنى الرجال في العالم، اضْطُر للانتظار لزراعة بنكرياس بديل، ومع ذلك فقد مات بعدها بفترة قصيرة.

إذا كانت الخلايا الجذعية هي المادة الخام الجديدة للطباعة العضوية، فإن طباعة أنظمة أوعية دموية معقدة بنحو ثلاثي الأبعاد تبقى المعادِل في هندسة الأنسجة لركض ميل واحد في أربع دقائق أو أقل من ذلك. في عام ٢٠٠٤، كتب الباحثون في جامعة ساوث كارولينا الطبية الأمريكية أن «تجميع أعضاء رخوة مزودة بأوعية دموية مطبوعة بنحو ثلاثي الأبعاد يبقى تحديًا كبيرًا.»[12] بعد سبع سنوات، ما زال هذا حقيقة.

ويصف أحد المقالات في مجلة «ساينس» بنحو معبِّر فيقول:

> من دون نظام للأوعية الدموية — الطريق السريع لتوصيل العناصر الغذائية والتخلص من الفضلات — فإن الخلايا الحية داخل أي هيكل نسيجي مطبوع بنحو ثلاثي الأبعاد تموت. لكن لا تمتلك الأنسجة الرفيعة المصنوعة من بضع طبقات من الخلايا هذه المشكلة؛ حيث إن جميعها تحصل مباشرة على الأكسجين والعناصر الغذائية؛ لذا فإن المهندسين الحيويين استكشفوا الطباعة الثلاثية الأبعاد كطريقة لصنع أنسجة أولية تحتوي على كَميات كبيرة من الخلايا الحية.[13]

حتى لو كان من الممكن طباعة أوردة حية بنحو ثلاثي الأبعاد فإن هذا لن يُكمل المَهمة، فبنحو يشبه تعريض الغضاريف المصنوعة في طبق بتري للجهد الناتج عن مفاعل حيوي لتتحول إلى أنسجة ناضجة؛ فإن العضو المليء بالأوعية الدموية — حتى لو كان من الممكن طباعته بنحو ثلاثي الأبعاد — لا يمكن وضعه مباشرة في الجسم، بل يحتاج إلى الاندماج أولًا مع ما حوله؛ فالأوردة والشرايين الجديدة يجب أن تندمج مع الأوردة والشرايين الحالية.

وصف جيمس يو، الأستاذ في معهد الطب التجديدي في جامعة ويك فورست، هذا التحدي قائلًا: «كيف يمكننا صنع أنسجة أُنتجت خارج الجسم وربطها بالأنسجة الأخرى؟ أيًّا كان ما ستضعه داخل الجسم يجب أن يكون مرتبطًا بالأوعية الدموية والدم والأكسجين في الجسم؛ هذا أحد التحديات التي سنواجهها عند التعامل مع الأنسجة الكبيرة.»

يعكف باحثو المستقبل للتقنية الحيوية بالفعل على محاولة التوصل إلى حلول لهذه المشكلات. أحد زملاء ما بعد الدكتوراه في جامعة ستانفورد، يُدعى ياسر شنجاني، سينضم قريبًا إلى الباحثين الطبيين الذين ينظرون للطباعة الثلاثية الأبعاد وبرامج التصميم باعتبارهما أداتين مهمتين في البحث الطبي. يقول ياسر: «أومِن بأن مستقبل هندسة الأنسجة سيندمج بنحو مذهل مع الطباعة الثلاثية الأبعاد.» يتخصص ياسر في طباعة العظام البديلة أو بمصطلحات أكثر تقنية «الطباعة الثلاثية الأبعاد لمواد خام من البوليمر غير العضوي القابل للارتشاف الحيوي» التي ترتبط مع جسم المريض في النهاية بعد زرعها.

يؤمن ياسر بأن الأسلوب الشمولي الذي يمزج بين تقنية الطباعة الثلاثية الأبعاد وبرامج التصميم وعوامل النمو الخاصة بالجسم البشري هو أفضل طريق للمضيِّ قدمًا.

وقد عمل ياسر في مرحلة الدراسات العليا مع فرق متعددة التخصصات من علماء الأحياء والجراحين وخبراء التصنيع والمواد الخام. يوضح ياسر: «العظام البديلة المثالية هي التي تكون هيكلًا مصممًا لمحاكاة النسيج الطبيعي فيما يتعلق بالشكل الهندسي والبناء المتناهي الصغر والسلوك الحيوي الميكانيكي، ويحل محله في النهاية نسيج طبيعي.»

سألت ياسر عما سيفعله بالمال إذا مُنح عدةَ ملايين من الدولارات لإنفاقها على تطوير الطباعة الحيوية. وكانت إجابته سريعة وواثقة: «سأنفق بعضها على تعلُّم طباعة الأعضاء المصنوعة من مواد غير قابلة للزراعة داخل الجسم المبذور داخلها عوامل حيوية (مثل الخلايا الجذعية وعوامل النمو). بعد ذلك، أود رؤية الطابعات داخل غرف العمليات، ثم الحلم الكبير هو إرسال روبوتات متناهية الصغر داخل جسم المريض حيث يمكنها طباعة أعضاء جديدة.»

إن طباعة الأنسجة الحية والأعضاء الجديدة مباشرة داخل الجسم سيكون إنجازًا طبيًّا جوهريًّا ومُنقِذًا للحياة. والطباعة داخلَ الجسم يمكنها بنحو ملحوظ تحسين معدلات النجاة بين الجنود المصابين في المعارك أو ضحايا الحوادث في غرف الطوارئ. وفي المواقف الأقل خطورة من الناحية الطبية، فإن القدرة على طباعة أنسجة حية مُشكَّلة بدقة ستفتح مجالات جديدة للرعاية الطبية والتدريب الجراحي، وستتيح طرقًا جديدة لتطوير الأدوية.

إن الأنسجة أو الأعضاء المصغَّرة الصناعية التي يمكن طباعتها حسب الطلب ستعمل كمِنَصات اختبار بحثية مفيدة بنحو كبير،[14] فيمكن استخدام هذه الأنسجة الصناعية في دراسة الأمراض أو تنمية الخلايا الجذعية لخلايا متمايزة ناضجة. وبدلًا من اختبار الأدوية الجديدة على الفئران أو في أطباق بتري — وكلاهما وسيط قريب من البشر — فإذا كانت الأعضاء المصغَّرة الصناعية يمكن طباعتها بنحو ثلاثي الأبعاد باستخدام خلايا مريض محددة، فيمكننا حينها تحديد فاعلية دواء جديد وآثاره الجانبية بنحو أكثر دقة.

يمكن للأعضاء المصغَّرة الصناعية المطبوعة بنحو ثلاثي الأبعاد مساعدة الجراحين الشباب في التدرب على الجراحة. ظلت الجثث لمدة طويلة حقل التجارِب الرئيسي، وهو ما يُمثِّل عدة مشكلات. فيمكن لمعظم المستشفيات التدريبية أن تتيح لطلابها تشكيلة عشوائية من الجثامين. بمعنًى آخر، مَن وافقوا على التبرع بأجسامهم للعلم يكونون — بنحو محبِط — عُرضة للموت بأسباب لا تتماشى بدقة مع المنهج المقرر لطلاب الطب أو مشروع بحثي معين.

تصلح أي جثة مختارة بعشوائية لتدريس المقررات التمهيدية. على الرغم من ذلك، وبالنسبة لطلاب السنوات المتقدمة (وباحثي الطب) المتلهفين للتعمق في تخصص معين، فإن هذه الطريقة العشوائية تحد من خياراتهم. على سبيل المثال، إذا كانت إحدى كليات الطب تهدف لتدريب طلابها على جراحة أورام المخ فهي تواجه مَهمة صعبة، بل مستحيلة تقريبًا، في الحصول على جثث حديثة الموت بأورام دماغية بنحو قانوني.

وإلى أن يمكننا طباعة الظروف الطبية بدقة بنحو ثلاثي الأبعاد، فإن كليات الطب ستستمر في العمل بأفضل ما هو متاح، وحتى في المستشفيات التي تضم أحدث غرف الجراحة، فإن الجراحين المتدربين يتعلمون الجراحة باستخدام وسائل ارتجالية قليلة التقنية. عندما زرت مستشفًى تعليميًّا كبيرًا، أراني أحد أعضاء طاقم التدريس كيف يدربون الطلاب على جراحة القلب المفتوح؛ وضع المدرس قطعتين من تي-شيرت في صندوق مغلق، وأخبرني أنه مطلوب من الطلاب خياطة قطع القميص معًا بإدخال أدوات جراحية في الثقوب المتناهية الصغر المصنوعة في جانب الصندوق.



نموذج مطبوع قائم على أشعة مقطعية للتدريب الطبي (الصورة مهداة من شركة أوبجيت).

يمكن للطابعات الثلاثية الأبعاد صنع نماذج خاصة للتدريب الجراحي حسب الطلب، ويمكن لهذه النماذج التدريبية المطبوعة أن تُصمَّم بعناية لمحاكاة خصائص الأعضاء أو

الأنسجة الطبيعية أو حتى قطاعات كاملة من الجسد. بهذه الطريقة، وحتى ينضج مجال الطباعة الحيوية الحقيقية، فإن كليات الطب يمكنها طباعة أجزاء «صورية» لها شكل وملمس الأعضاء الحقيقية، وتحتوي على ظروف الموت والأمراض حسب الطلب.

اليوم، تُستخدم بالفعل نماذج جراحية مطبوعة بنحو ثلاثي الأبعاد للأعضاء أو العظام. والتخطيط الجراحي أو النمذجة الجراحية، هو غرفة قياس الملابس التي يتدرب فيها الجراحون قبل الجراحة باستخدام «أجزاء للتدريب» بمقاس واقعي تُمثِّل العظام أو الأعضاء التي سيُخضعونها للجراحة. لتوفير الوقت والحوادث المحتملة أثناء الجراحة الحقيقية، يتدرب الجراحون على تجميع وخياطة وحتى تدبيس هذه الأجزاء الصناعية، وتساعد النماذج الجراحية كذلك الجراحين في توضيح الإجراءات الجراحية لعائلات المرضى.



يتدرب الأطباء البيطريون على جراحة لعظام الورك لكلب باستخدام نماذج جراحية مطبوعة بنحو ثلاثي الأبعاد لعظام الكلب.

النماذج الجراحية المطبوعة بنحو ثلاثي الأبعاد والأجزاء البديلة الجامدة هي مجرد بداية، وستأخذ الطباعة الحيوية الطب المخصص إلى آفاق جديدة. في الوقت الحالي، فإن الباحثين الطبيين والتقنيين يواجهون نطاقًا عريضًا من العقبات، سواء كانت تقنية أو حيوية أو اجتماعية أو تنظيمية.

تتكون أجسادنا من آلاف الأنواع المختلفة من المواد الخام، ويمكن للطابعات الثلاثية الأبعاد اليوم طباعة عدد قليل فقط من تلك المواد في المرة الواحدة. والأعضاء معقدة التركيب تمتلئ بالأوعية الدموية، والعديد من الأعضاء المهمة مثل القلب لا تتيح مجالًا للأخطاء التقنية أو التعديلات. ولا يوجد من يفهم بنحو كامل كيف يبث الحياة في أعضاء الجسم الصناعية، وحتى أبسط أعضاء الجسم تعمل طبقًا لتفاعل داخلي منظم بدقة شديدة لآلاف الأنواع المختلفة من الخلايا.

تبقى هندسة الأنسجة أمرًا صعبًا ودقيقًا تحكمه القضايا الأخلاقية والجدل السياسي وعمليات تنظيمية صارمة بحق. ويمكن أن يستغرق الحصول على موافقة الهيئات الحكومية التنظيمية على الأساليب الطبية الجديدة عدة سنوات وملايين الدولارات المنفقة على البحث، وربما يستغرق الأمر سنوات لتشجيع الجراحين الممارسين والأطباء وشركات التأمين الطبي لقبول الطباعة الحيوية كممارسة طبية قياسية.

ستغير التطورات السريعة في التقنيات الطبية والطباعة الثلاثية الأبعاد شكل الطب. إن الطب الحديث اليوم كان سيبدو إعجازيًّا إذا عُرض على شخص كان يعيش منذ مائة عام، وربما في غضون مائة عام تصبح الطباعة الحيوية إجراءً طبيًّا شائعًا، وتصبح المعادلَ التقني لينبوع الشباب.

الفصل الثامن

# المطبخ الرقمي

سيكون الطاهي الجديد خاصتك طابعةً ثلاثية الأبعاد تقبع في مطبخك موصلة بالإنترنت وتنتظر رسائل نصية أو بريدًا إلكترونيًّا بتعليمات حول وجبتك القادمة.

عندما أتحدث عن الطباعة الثلاثية الأبعاد للطعام، عادةً ما يكون رد فعل الناس التَّندُّر الممزوج بقدر ضئيل من الاشمئزاز. هناك شيء ما يجعل من كبس مواد غذائية خام في رأس طباعة أمرًا غريبًا لدى الكثير من الناس. هذا أمرٌ مثير بالتأكيد لكنه يُعامَل بنفور شديد.

مع ذلك، فإن طباعة الطعام تثير حماس الناس. في إحدى المرات خارج أحد الفنادق في العاصمة واشنطن، رآني مدير موقف سيارات الأجرة الخاص بالفندق أُعاني لحمل طابعة فاب آت هوم ثقيلة وتشبه الصندوق. ترك المدير مكانه واتجه نحوي لكن ليس لإحضار سيارة أجرة لي بل لإلقاء نظرة عن قرب على الطابعة.

صرخ الرجل مشيرًا إلى الطابعة: «لقد رأيت هذه على السي إن إن! هل أنت الرجل الذي يطبع الطعام؟» رددتُ بالإيجاب؛ حيث كنتُ أنا والطابعة بالفعل ذلك الثنائي الذي رآه على شاشة التلفزيون. تفحَّص الرجل الطابعة التي كنت أحملها، وهو يشير إلى سيارة أجرة، واستمر قائلًا في حماس: «لقد شاهدت أنا وزوجتي البرنامج، وأرادت الحصول على واحدة من هذه الطابعات. لديها العديد من الأفكار لصناعة بسكويت الطيور الغاضبة، كما أن شقيقها من الممكن أن يطبع لنفسه بعض البروكلي …»

لاحقًا في نفس الأسبوع، وفي مؤتمر لمديري الفنادق التنفيذيين، قدمت عرضًا عن طباعة الطعام، وكانت الفكرة العامة للمؤتمر هي: «ما الذي ينتظر صناعة الضيافة؟» وعلى مدار اليوم، جلس بضعة من المديرين التنفيذيين متأدبين، وأنصتوا مدوِّنين ملاحظات

بين الحين والآخر. وللقضاء على الملل، كان المتحدثون والحاضرون يذهبون بين الحين والآخر إلى مؤخرة الغرفة لتناول أطعمة خفيفة فاخرة أو إعادة ملء أقداح القهوة. وأخيرًا، وبعد يوم طويل من الاستماع وتناول الطعام، بدأ عرضي عن طباعة الطعام.

وضعت طابعة فاب آت هوم على الطاولة، وملأتُها بعجين البسكويت، وبدأت في الطباعة. بعد دقائق، بدأ الجمهور في مد رقابهم والوقوف لرؤية ما الذي تفعله الطابعة، وخَلَت المقاعد. توقفت لبُرهة، محتارًا وقلقًا بعض الشيء، بينما بدأ الحاضرون في الانتقال إلى مقدمة الغرفة.

تفرَّق الحضور، وتشكَّل حشد حول طابعة الطعام. نسي المديرون التنفيذيون الهيبة والمراكز الوظيفية للحظات، وتجمَّعوا حول الحافظة البلاستيكية للطابعة يشاهدون الفوهة، وهي تُصدر أزيزًا، ذهابًا وعودة، وتُخرج عجين البسكويت على هيئة أشكال مختلفة. باستحواذ صانعة البسكويت الأتوماتيكية على الانتباه، أنهيت العرض التقديمي بسرعة، وانتقلت إلى جلسة السؤال والجواب.

رجع الناس إلى مقاعدهم، وبدأت جلسة عصف ذهني. اقترح أحد مديري التسويق أنه يجب على برنامج «ولاء العملاء» خاصتهم تصميم طعام حسب الطلب، وتقديم حلوى طازجة مطبوعة بنحو ثلاثي الأبعاد للضيوف في مكتب الاستقبال. اقترحتْ أخرى أن فندقها يمكن أن يضع أطعمة خفيفة مطبوعة بنحو ثلاثي الأبعاد ذات توجه معين في قوائم الطعام لخدمة الغرف، أو تصنيع أطعمة خفيفة حسب الطلب لتلبي أذواق الضيوف المتنوعة أو حاجاتهم الغذائية.

اتضح لي أن الجميع — مهما كانت وظيفتهم أو منصبهم — مهتمون بإعداد الطعام. ما زالت الطباعة الثلاثية الأبعاد للطعام في مَهدها، وهي مجال لبضعة مغامرين جُرَآءُ في فن الطهي وباحثين أكاديميين كذلك. لكن طابعات الطعام — مثلها مثل أفران المايكروويف وصانعات القهوة الآلية — لها جاذبية اجتماعية هائلة.

## (١) الطهي الرقمي

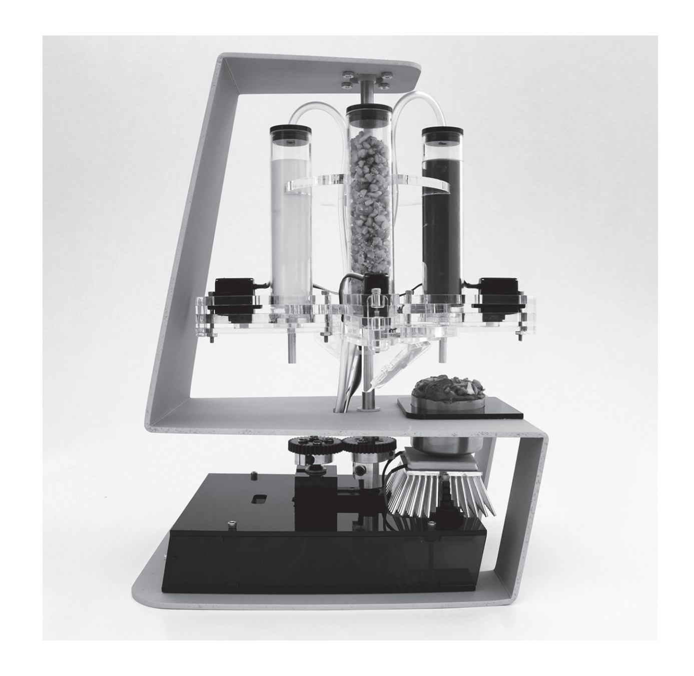
لن ترى أي طابعة تِجارية ثلاثية الأبعاد للطعام في أي متجر محليٍّ للإلكترونيات، لكن بعد بضع سنوات، ربما تُباع هذه الطابعات في متاجر الأجهزة المنزلية، وستبدو مثل «قرن وفرة أوتوماتيكي»،[1] وهو مفهوم تصميمي لعائلة تضم أربعة نماذج أولية لطابعات طعام: ديجيتال تشوكليتير وديجيتال فابريكيتور وروبوتيك شيف وفيرتشوسو ميكسر.

أطلق الفريق الذي صمم فكرة قرن الوفرة، بقيادة مارسيلو كويليو وجيمي زيجلباوم، المفهوم التصميمي على موقع الويب خاصته بنشر مجموعة من الصور المدهشة لكل نموذج أولي مستقبلي. بعد نشر صور تصميمات أفراد عائلة طابعات الطعام هذه، كانت من الواقعية لدرجة أنها أثارت عاصفة فورية من الاهتمام على الإنترنت. لم يكن الناس متأكدين إن كانت صور التصميمات تعرض طابعات طعام حقيقية أم مفاهيم تصميمية مجسَّمة بمهارة. في النهاية وبعد إزالة الالتباس — بنحو أحبط المتحمسين للطباعة الثلاثية الأبعاد ومحبي الطعام ممن ينزعون إلى التقنية — اكتشف محبو الطعام أن هذه النماذج الأولية لم تصبح منتجات متاحة للشراء بعدُ.

كان الهدف من وراء تصميم قرن الوفرة هو تغيير وجه عملية طهي الطعام. يفسر موقع الويب الخاص بالمشروع هذا الأمر: «في الوقت الذي غيرت فيه الوسائط الرقمية كل وجه من أوجه المجتمع، فإن التقنيات الأساسية التي نلقاها في المطبخ اليوم لا تُوفِّر إلا تطويرًا هامشيًّا للأدوات التي نستخدمها منذ مِئات السنين.» صُمم كل نموذج من نماذج عائلة الطابعات الجديدة لتنفيذ عملية أساسية من عمليات الطهي. ما يجعل هذه الطابعات ثورية هو إدخال الحوسبة لمجال الأطعمة. قال كويليو وزيجلباوم، عبر موقع الويب الخاص بهما، إن النماذج الأولية خاصتهما يمكن أن تُوفِّر طريقة جديدة للطهي بالتحويل الفعلي والكيميائي لـ «مكونات الطعام» إلى مركبات جديدة وإخراجها في النهاية على هيئة أشكال وتركيبات مستساغة ومبهجة للعين.

توضح الجاذبية الجمالية والعاطفية الكبيرة لنماذج الطابعات هذه الاحتمالات الكامنة في الابتكار التقني للطهي وتناول الطعام، فتلك الطابعات ستُوفِّر فرصًا جديدة للإبداع؛ فقاطعات البسكويت وقوالب الكعك، مثل آلات التصنيع التقليدية، لها القيود الخاصة بها عندما يتعلق الأمر بصنع أشكال ونماذج دقيقة ومعقدة. على النقيض من هذا، فإن الطهي الرقمي، طبقًا لكويليو وزيجلباوم، سيتيح «صنع نكهات وأشكال قوام لا يمكن تخيُّل صنعها تمامًا بطرق الطهي الأخرى.»

إذا كانت تلك الطابعات حقيقية، فإن كلًّا منها ستمتلك شاشة باللمس، وبطاقة ذاكرة داخلية تمكِّن المستخدمين من حفظ وصفات الطعام المفضلة، واتصالًا بالإنترنت حتى يستطيع المستخدم التحكم في مصدر وجودة وطعم كل وجبة وقيمتها الغذائية.[2] سيتيح النموذج ذو الاسم الجذاب ديجيتال تشوكليتير لمستخدميه تصميم وتجميع وتذوق العديد من حلوى الشكولاتة بنحو سريع. وطبقًا للتصميم، فإن مكونات تلك الطابعة



ديجيتال تشوكليتير هو مفهوم تصميمي لطابعة طعام يمكنها صنع أنواع شكولاتة مخصصة (الرسم التوضيحي إهداء من مارسيلو كويليو).

ستُخزَّن في خراطيش معدِنية موضوعة على حامل دوَّار. وإذا كنتُ سأشتري تلك الطابعة، فسأود تزويدها بزر للنشر حتى يمكنني نشر وصفة ناجحة لصنع نوع معين من الأطعمة المحتوية على الشكولاتة على أحد مواقع الويب أو إرسالها لصديق.

النموذج الأولي الثاني من نماذج تلك الطابعات هو ديجيتال فابريكيتور، وهو طابعة شخصية مجسمة للطعام. وكما يقول الموقع الخاص بالمصممين، فإن عملية صنع تلك الطابعة للطعام تبدأ بـ «مجموعة من أوعية الطعام التي تبرد وتخزن مكونات الطعام المفضلة الخاصة بالمستخدم.» ستُخزن الطابعة وتخلط وترسب وتطهو طبقات من المكونات الغذائية؛ مما يتيح صنع نكهات وتكوينات غير ممكنة الصنع بطرق الطهي التقليدية.

توضح صور تلك الطابعة آلة لامعة بحجم فرن المايكروويف تمتلك رفًّا لامعًا يحمل خراطيش فِضيةً للطعام، كلٌّ منها موضوعة في لولب معدِني، ولها المظهر المصقول الجذاب لأوعية رجِّ الكوكتيلات من نوع ويليامز-سونوما. سيُشرف كمبيوتر على عملية صنع الطعام؛ حيث يعطي تعليمات لكل خرطوشة طعام لضخ المكونات الخام التي تحتويها داخل خلاط مركزي؛ حيث تُخلط وتُدفع خلال رأس لتُخرِج الطعام على شكل تركيبات غذائية متقنة ومرتبة بدقة.

العضوان الأخيران من عائلة طابعات الطعام المستقبلية هذه هما روبوتيك شيف وفيرتشوسو ميكسر. تقوم فكرة الأول على تحويل هيئة وتكوين أي طعام صُلب؛ مثل شرائح اللحم أو الأسماك أو الفاكهة. في حين يصور تصميم الثاني آلة مكونة من حاملٍ دوَّار بثلاث طبقات يتيح للطهاة طريقة فعالة لخلط العديد من المكونات المختلفة وتجرِبة الاختلافات الدقيقة في الطعم والتكوين.

أتمنى أن تصبح طابعات الطعام المنزلية يومًا ما سهلة التشغيل ولها جاذبية مثل تلك الطابعات. ستُوفِّر طباعة الطعام — أو الطهي الرقمي — آفاقًا إبداعية جديدة في الطهي، بالإضافة إلى طرق مناسبة لتحضير الطعام لمن لا يمتلكون الوقت الكافي؛ فستتيح طابعات الطعام والوصفات الرقمية وخراطيش الطعام المناسبة لذلك للطهاة صنع أطعمة جديدة ومتوازنة القيمة الغذائية؛ مما يفتح أسواقًا جديدة للطهي.

لسوء الحظ، فإن الطهي الرقمي يظل في الأغلب أمرًا نظريًّا. لم تطلِق بعدُ كبريات شركات ومصنعي الطعام التي تبيع أجهزة منزلية أي طابعات طعام على المستوى التِّجاري؛ وكنتيجةٍ لهذا، فإن معظم عمليات طباعة الطعام اليوم تحدث في معامل الأبحاث؛ حيث يجرب الطلاب والعلماء والمهندسون طباعة الطعام بالصدفة أثناء محاولتهم حل مشكلة تصميمية أو هندسية غير متعلقة بها.

يُعتبر معجون الأطعمة مادة اختبار مناسبة للعلماء والمهندسين. الطعام رخيص ومتوافر وغير سام؛ وبسبب تنوع المكونات الخام المتوافرة، فإن أي باحث واسع الحيلة يمكنه العثور على مكونات الطعام التي تحاكي خصائصها خواص المواد الخام للطباعة الأكثر تكلفة وندرة.

تعرفت أنا وطلابي بالصدفة على مجال طباعة الطعام بسبب مصادفة هندسية أثناء عملنا مع طابعة فاب آت هوم. بدأ هذا عندما أدرك أحد طلاب الدراسات العليا الذين أُشرف عليهم أن الطبقة السكرية التي تُستخدم لتزيين الكعك تصلُح كمادة خام رائعة




تصميمات مقترحة لمُصنِّعات طعام رقمية (الرسم التوضيحي مُهدًى من مارسيلو كويليو وأميت زوران).

لتصميم النماذج الأولية لمشروعات التصميم الهندسي ومعايرة إعدادات الطابعات. يذوب سكر تزيين الكعك في الماء؛ لذا من السهل شطفه في الحوض ... أو ربما لعقه عندما تكون بمفردك؛ لذا، سرعان ما أصبح المادةَ الأكثر استخدامًا في مشروعات الطباعة الثلاثية الأبعاد.

لم أكن أنا وطلابي الوحيدين الذين جربوا طباعة الطعام بنحو ثلاثي الأبعاد؛ فمنذ سبع سنوات عندما أطلقنا طابعة فاب آت هوم، كنا نتوقع أن يُصنِّع الناس طابعات ويستخدموها لطباعة أجزاء بلاستيكية أو ربما ألعاب أو أشياء مفيدة داخل منازلهم؛ لكن بدلًا من ذلك، أرسل مستخدمو فاب آت هوم لنا تجارِبهم عن طباعة الطعام. كانت نوي شول، إحدى طالبات المرحلة الثانوية من مدينة لويفيل بولاية كنتاكي، من أوائل مستخدمي تلك الطابعة عندما جعلنا تصميماتها مفتوحة المصدر في عام ٢٠٠٦. صنعت نوي، بمساعدة والدها ماور، طابعة فاب آت هوم الخاصة بها، وخصصتها مضيفةً رأسًا تنبثق منه شكولاتة ساخنة.

على مدار عدة أسابيع، جرب آل شول درجات حرارة وفوهات طباعة مختلفة، وأفلحت مجهوداتهم في النهاية في معرض علوم بالمدرسة الثانوية في الولاية؛ حيث صممت



قطعة الشكولاتة المطبوعة التي أدت إلى فوز الطالبة نوي شول بالجائزة الأولى في أحد معارض العلوم في مدرسة ثانوية في عام ٢٠٠٦.

نوي وطبعت قطعًا من الشكولاتة على شكل ولاية كنتاكي؛ مما ضمن حصولها على الجائزة الأولى.

## (١-١) كيس الحلواني الإلكتروني

تُعتبر طباعة ولو أي معجون طعام بسيط تجرِبةً دقيقة ومعقدة في الهندسة التطبيقية للطعام، ومثل العديد من التسليات في الحياة، فإن طباعة الطعام الثلاثية الأبعاد أصعب كثيرًا مما تبدو؛ فيجب صنع الطعام المطبوع باستخدام القدر المناسب من القوة الآلية بالإضافة لوصفة طعام رقمية مصمَّمة بعناية باستخدام المواد الخام ذات القوام المناسب. ويجب أن تكون المكونات الخام طرية بما يكفي لدفعها عبر طرَف محقن لكنها تمتلك الصلابة الكافية للاحتفاظ بشكلها بعد طباعتها. أضف إلى هذا، التحدي المتمثل في التعامل مع الخواص المتفردة لكل مادة من المواد الغذائية، وتحمُّلها المختلف للحرارة، وطرق طهيها المختلفة.

لا يُعتبر ساندوتش الهامبرجر معقَّد الصنع إذا كنت ستصنعه بالطريقة التقليدية بشواء قطعة اللحم ووضعها على رغيف خبز مع شرائح من الطماطم والبصل وبعض الكاتشب؛ لكن عند استخدام طابعة ثلاثية الأبعاد فإن صناعة هذا الساندوتش تُصبح تحديًا هندسيًّا معقدًا في طباعة الطعام متعدد الطبقات؛ فطباعة ساندوتش هامبرجر لذيذ طازج، بكل التوابل المناسبة، بنحو ثلاثي الأبعاد — لو كان هذا ممكنًا — ستكون عملًا فذًّا في هندسة الطعام.

إن طباعة لحم مفروم خام طازج على هيئة قرصٍ أمرٌ بسيط، وطباعة بعض الكاتشب فوقه كذلك لن تكون مشكلة كذلك، وحتى طباعة وخَبز عجين الخُبز ستكون غالبًا مسألة محسومة هندسيًّا.

تصبح طباعة الطعام صعبة عند صنع طعام طازج أو طبيعي؛ فطباعة شرائح طازجة ولذيذة من الطماطم والبصل والخس ذات طعم جيد وتبدو «طبيعية»، تُدخلك في عالم هندسة الطعام الصناعي الشاق؛ فطباعة ساندوتش هامبرجر ساخن طازج بنحو ثلاثي الأبعاد تُعَد عملًا هندسيًّا يعادل في صعوبته طباعة عضو بشري معقد بنحو ثلاثي الأبعاد؛ ولهذا يجب على الباحثين الأكاديميين ومحبي التقنية من محبي الطعام الاكتفاء في الوقت الحاليِّ بتصميم وطباعة الأطعمة البسيطة الطرية.

تسير العملية الأساسية لطباعة الطعام كالآتي: مثل أي منتج آخر مطبوع بنحو ثلاثي الأبعاد، فإن إعداد الطعام يبدأ بملف تصميم، لكن لا يوجد أي برنامج تصميم تِجاري يمكن النظر إليه بعدُ كبرنامج تصميم للطعام بمساعدة الكمبيوتر. يُنزِل محبو طباعة الطعام ملفات التصميم من الإنترنت أو يصنعون ملفات التصميم خاصتهم من البداية باستخدام برامج التصميم الهندسي.

صُنِعت الطابعات التِّجارية المتاحة للمستهلكين؛ مثل ريب راب أو طابعات ريبليكيتور الشهيرة الخاصة بشركة ميكربوت، لتطبع شرائط من البلاستيك تشبه المكرونة الاسباجيتي من بكرات تغذي رأس الطباعة. ولطباعة الطعام، يجب أولًا تجهيز الطابعة خصوصًا حتى يمكنها العمل بموادَّ خام قابلة للأكل. تُعتبر الطابعات الثلاثية الأبعاد التي تكون مخططاتها الأولية المفتوحة المصدر هي النوع المثالي لإحداث التعديل الذي تحتاج إليه طباعة الطعام في الوقت الحالي.

يحوِّل معظم الناس طابعات البلاستيك خاصتهم إلى طابعات طعام بتوصيل محاقن مليئة بالمواد الخام للأطعمة بذراع الطباعة، ويستخدم بعض الطابعات مِكبسًا بمحرك

للضغط على محاقن الطعام. ويتضمن الحفاظ على ضغط المحرك مناسبًا في الوقت الصحيح معايرة المكبس الآلي لكل مرة تعمل فيها الطابعة من أجل استخدام الدرجة المناسبة من القوة. يدرك أي طاهٍ بشري بنحوٍ غريزي متى يجب عليه استخدام الضغط، ومتى يستخدم اللمسة الخفيفة؛ لكن طابعة الطعام لا تعرف هذا.

إحدى الطابعات الاستهلاكية التِّجارية الرائدة، وهي طابعة ريبليكيتور من شركة ميكربوت، يمكن تحويلها إلى طابعة طعام إذا أضيف لها جزء يسمَّى «قاذف سكر الزينة». هذا الجزء يُثبَّت إلى الجدار الداخلي للطابعة الثلاثية الأبعاد؛ وتثبِّت مشابك بلاستيكية فوهة الطباعة بنحوٍ محكم في مكانها، ويمكن للمستخدمين إعادة وضع الطعام الطازج في الفوهة باستخدام غطاء قابل للالتواء.

تُخرج الفوهة الطعام بمساعدة الضغط الذي يوفره ضاغط هواء موصَّل بالطابعة، يستطيع قاذف سكر الزينة تحمُّل ضغط يصل إلى مائة رطل لكل بوصة مربعة، وهو ما يكفي لملء إطار دراجة بالهواء. مع ذلك، فإن موقع الشركة يحذر المستخدمين من تجاوز حاجز المائة رطل لكل بوصة مربعة. لكنهم لا يحددون بالضبط ما الذي سيحدث، لكني يمكن أن أتخيل أنه سيكون هناك انفجار صغير سيلطخ حوائط المطبخ بزبدة الفول السوداني أو النوتيلا أو أي مادة لزجة مشابهة.

تحتاج وصفات الطعام المختلفة لدرجات مختلفة من القوة الميكانيكية، كما تؤثِّر درجة حرارة الغرفة أحيانًا على تدفق معجون الطعام خلال فوهة الطباعة. كذلك فإن حجم — أو قطر — الفوهة يُعد عاملًا مهمًّا؛ فإذا كانت الفوهة صغيرة للغاية، فإن معجون الطعام لن يخرج بالسرعة المناسبة، وإذا كانت الفوهة كبيرة للغاية، فإن الطعام المطبوع سيخرج غير متقن وليس بالشكل المطلوب.

وحتى إذا كانت فوهة الطباعة بالشكل المناسب ويتدفق الطعام بالمعدل الصحيح، فإن بعض المواد الخام للأطعمة لا تتصرف داخل المحقن كما هو مخطط لها؛ فأحيانًا تتجمع قطرات الزيت معًا مكوِّنة كتلًا أو يترسب الماء الموجود في معجون الطعام في قاع المحقن؛ مما ينتج عنه قطعة مشوهة الشكل من الطعام المطبوع لا تبدو بأي حال من الأحوال كما كان ينوي صانعها.

أحد أكثر الجوانب المربكة للطباعة الثلاثية الأبعاد للطعام هو طريقة صنع هذه الأطعمة. غالبًا ما يسيء الناس فهم هذه العملية ويظنون أن فوهة الطباعة ستُخرِج

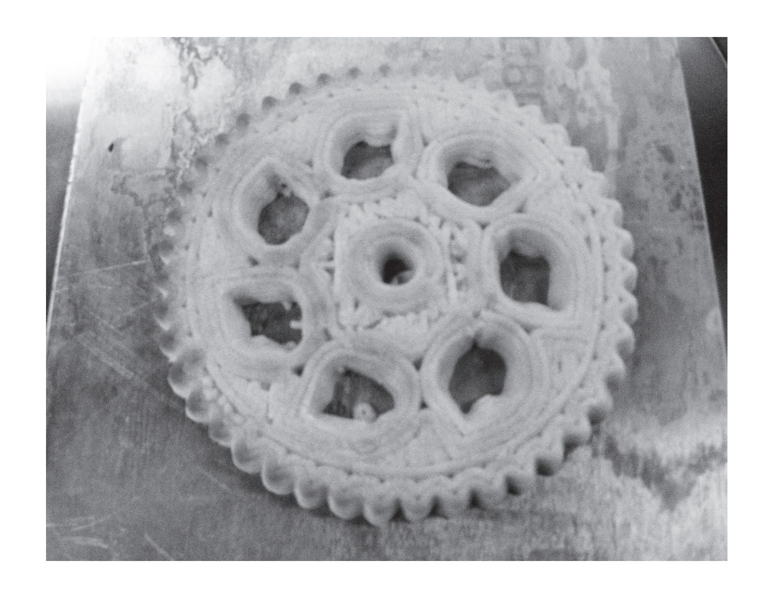
بطريقةٍ ما صدور الدجاج المقلية أو شرائح الخبز الجاهزة للأكل، لكن طابعات الطعام الثلاثية الأبعاد اليوم لا تمتلك القدرة الفنية على تشويح أو قلي أو شواء ما تطبعه. على الرغم من ذلك، تستطيع خَبز البسكويت؛ فالطابعة «تخبز» البسكويت باستخدام مِنصة ساخنة تقبع تحت رأس الطباعة، وأثناء طباعة كل قطعة بسكويت، فإن المِنصة الساخنة تحمص عجين البسكويت النِّيء.

## (١-٢) قطع البسكويت الناعم ... عالية ومنخفضة الدقة

يتعلق احتفاظ الطعام المطبوع بنحو ثلاثي الأبعاد بشكله ومظهره الجذاب بدقة الطباعة. في السابق، عندما كان الناس يستخدمون كلمتَي «دقة» و«طعام» في نفس الجملة، كانوا يشيرون عادة إلى معاناتهم في الالتزام بالنظام الغذائي. أما في العالم الجديد الجريء لطباعة الطعام بنحو ثلاثي الأبعاد، عندما يتحدث الخبراء عن الدقة، فهم يشيرون إلى مدى احتفاظ الطعام المطبوع بشكله. وطبقًا لبراندون بومان، وهو حداد ماهر سابق وطالب حالي في معمل سولهايم للتصنيع بالإضافة في جامعة واشنطن، فإن عجين البسكويت الناعم يُعتبر مادةَ خامٍ مثالية للطباعة الثلاثية الأبعاد. وحسبما يقول بومان، فإن عجين البسكويت الناعم أثناء خَبزه «يحافظ على الدقة الكافية لطباعة سن في ترس». وعكس عجين بسكويت زبدة الفول السوداني أو رقائق الشكولاتة، فإن عجين البسكويت الناعم يمكنه تحمُّل الضغط العالي ولا يتفتت داخل الفرن.

توصل براندون لذلك أثناء العمل على مشروع بحثي في هندسة الأنسجة. تضمَّن بحثه تطبيق تقنيات الطباعة الثلاثية الأبعاد لمساعدة ضحايا الحروق الشديدة على إعادة الإنماء السريعة لأنسجة الجسم التالفة. كان الهدف الأساسي لبحثه هو طباعة سقالات للأنسجة القابلة للتحلل الحيوي يؤدي شكلها لتسريع عملية نمو البشرة الجديدة ثم تتحلل ليبقى الجلد الجديد ينمو في سلام.

وبما أن الطباعة الحيوية للأنسجة الصناعية تُعتبر مجالًا حديثًا، فإن الباحثين يصنعون مواد الطباعة خاصتهم. كانت المادة التي اختارها براندون هي أصداف السلطعون المطحونة والمخلوطة بمكونات أخرى لإكسابها القوام المناسب. يقول براندون: «أمضيت الشتاء في جمع أصداف السلطعون وتجفيفها وطحنها لمسحوق لصنع العجين.» لكن جمع السلطعون في المياه المتجمدة لمنطقة بوجيت ساوند، وخاصة في شتاء ولاية سياتل الطويل المظلم، عملٌ بطيء ويعرِّضك للبرد القارس.



قطعة بسكويت ناعم لذيذة عالية الدقة مطبوعة بنحو ثلاثي الأبعاد (الصورة مهداة من جيسون بومان من جامعة واشنطن).

وجد براندون أنه يضيع مسحوق أصداف السلطعون الثمين بنحو سريع بسبب المشكلات الميكانيكية للطابعة وقوام معجون الأصداف؛ فالمعجون يتفتت أو يفشل في الحفاظ على شكله بعد طباعته بمجرد أن يخرج من فوهة الطباعة. وبما أن مزيج براندون الثمين كان ينفد بسرعة، فقد أدرك أنه ربما تكون هناك طريقة أخرى لإجراء تجارِب على خصائص مادة المعجون.

كان يحتاج إلى مادة اختبار تشبه في تركيبها وعملها مسحوق أصداف السلطعون، وكان الحل هو مزيج من المِلح والدقيق والسكر والزبد والماء؛ أي عجين البسكويت الناعم. فسَّر براندون الأمر لي عندما تحدثت معه على الهاتف قائلًا: «قررتُ أنه إذا كان يمكنني صنع عجين البسكويت الناعم الذي يستطيع الحفاظ على قوامه، فسيساعدني هذا في صنع سقالات للأنسجة لمساعدة ضحايا الحروق في استعادة بشرتهم مرة أخرى.»

يقول براندون: «أفضل ما في عجين البسكويت هو أنه رخيص ويسهل الحصول عليه.» وأضاف ضاحكًا: «ظن أصدقائي الخبازون أنها طريقة غريبة للقيام بأبحاثي، لكن بالنسبة إليَّ فقد كان الحصول على بسكويت ناعم أتناوله في نهاية يوم عمل طويل داخل المعمل تغييرًا للأفضل.» جمَّع براندون طابعة طعام مخصصة من نوع ريب راب بروسا، وزوَّدها بقاذف لسكر الزينة من إنتاج شركة ميكربوت وبعض محابس لور، أو الفوهات المستخدمة في الأجهزة الطبية.

إليكم وصفة براندون لصنع البسكويت الناعم عالي الدقة المطبوع بنحو ثلاثي الأبعاد:

كوب من الدقيق.
نصف كوب من السكر المطحون.
امزجهما جيدًا ثم أضف.
أصبعًا من الزبدة.
نصف كوب من العسل.
ملعقة صغيرة من الفانيلا.
ربع إلى نصف ملعقة صغيرة من المِلح (اختياري).
يُدخل هذا المزيج في عشرة إلى خمسة عشر محقنًا للطباعة بسعة ٥٠ سنتيمترًا مكعبًا بمحابس جرين لور.
ثم يُخبز من سبع إلى اثنتي عشرة دقيقة في درجة حرارة ٣٥٠ فهرنهايت.

«تَخبِز» الطابعة البسكويت باستخدام مِنصة ساخنة تقبع تحت رأس الطباعة، وأثناء خروج كل قطعة بسكويت، تخبز المِنصة العجين النِّيء. أحب تسمية هذه العملية «الطهي المباشر».

تمثِّل أي وصفة بسيطة للبسكويت الناعم تحديًا هندسيًّا معقدًا. وصف براندون بعض التحديات التي واجهها قائلًا: «أي نوع من صودا أو خميرة الخبز يسبب التمدد السريع، وسيؤدي الماء المستخدم في الوصفة إلى ترهل وتمدُّد البسكويت المطبوع.» بالطبع هناك أيضًا الجانب الجمالي. يضيف براندون: «العثور على التوازن المناسب بين سهولة الطباعة ودقة الخبز وفي نفس الوقت الحفاظ على الطعم هو أصعب ما في الأمر.»

## (١-٣) قطع البسكويت التي تحتوي على نص

أحد أفضل الأمور المتعلقة بتناول قطع اللازانيا هو تركيبها الداخلي؛ التنوع الغني لأنواع الجبن وعيش الغراب والمكرونة المختلفة في الجزء الداخلي الطري اللزج والقشرة الخارجية القاسية للمكرونة المخبوزة، لكن الطباعة باستخدام مواد خام متعددة ما زالت في مهدها.

منذ بضع سنوات، طبع فرانتس نيجل — وكان حينها في جامعة كورنيل — قطع بسكويت متعددة المواد الخام بعجين بلونين مختلفين. كان فرانتس بالفعل خبازًا ماهرًا، من النمسا؛ وهي بلد يَشتهِر بالإتقان في الخَبز. في الواقع، كانت جدته معروفة بصنع الحلوى الراقية؛ إذ كانت خبازة متفردة حتى بين صانعي المعجنات المهرة في النمسا.

كان هدف فرانتس هو إثبات أنه يمكن استخدام الطباعة الثلاثية الأبعاد متعددة المواد الخام لصنع أجسام بهندسة داخلية معقدة. كان المشروع التصميمي لفرانتس هو طباعة قطع بسكويت تحتوي بداخلها على مفاجأة خاصة لمن سيتناولها، وفي النهاية، ومثل براندون، وجد أن عجين البسكويت مادة خام مثالية للطباعة.

كانت المفاجأة هي شكل داخلي سيظهر بنحو غير متوقع عند قضم البسكويت. صنع فرانتس ملف تصميم، وأعد مِنصة اختبار لتجرِبتها على طابعة فاب آت هوم باستخدام فوهتي طباعة مختلفتين، تحتوي الأولى على عجين بسكويت الشكولاتة والأخرى على الفانيلا.

بدت المجموعة الأولى من بسكويت الشكولاتة والفانيلا رائعة عندما خرجت من فوهة الطابعة. لقد نجح ملف التصميم بمساعدة الكمبيوتر في مَهمته، لكن المشكلة حدثت عند خَبز البسكويت؛ حيث فقد العجين النِّيء شكله في الفرن بسرعة وانصهر ليتحول إلى كتل مشوهة لا شكل لها. لقد طبع فرانتس قطع بسكويت لذيذة لكنها بدت كقطع فحم رَمادية. الأسوأ من هذا أن المفاجأة المفترض وجودها داخل البسكويت فسدت تمامًا، وصارت لطخة غير واضحة المعالم من العجين الأبيض والبني.

بعد وقفة مع النفس، والمزيد من البحث حول ما إن كان الكاكاو أو الفانيلا له أي خواص غير معروفة تجعله يتصرف بنحو غير متوقع أثناء دفعه خلال فوهة الطابعة، كان فرانتس مستعدًّا للتجرِبة مرة أخرى. تذكَّر فرانتس أنه عندما كان طفلًا، اعتادت جدته صنع بسكويت معروف بشكله المموج الجميل. اتصل بعائلته في النمسا، وبعد القليل من التفسير، نجح في الحصول على الوصفة الثمينة لبسكويت جدته.

بأمل جديد، ملأ فرانز الطابعة بكَمية جديدة من عجين بسكويت الشكولاتة والفانيلا. قام ملف التصميم والطابعة بدورهما في التجرِبة على أكمل وجه؛ حيث أخرجا العجين



قطعتا بسكويت مطبوعتان بنحو ثلاثي الأبعاد وتحتويان على حرف «سي» (الصورة مهداة من جيفري ليبتون وفرانتس نيجل).

ذا الشكل المثالي المطلوب على مِنصة الطابعة. بعد ذلك أتى الاختبار الكبير لتحديد ما إذا كانت المجموعة الجديدة من قطع البسكويت ستحتفظ بشكلها، من الداخل والخارج، داخل الفرن.

بعد مرور ٢٨ دقيقة من الانتظار القلق، أخرج قطع البسكويت، ومثل المجموعة الأولى، كانت رائحتها شهية، لكن عكس سابقتها، فإن قطع البسكويت هذه المرة كان شكلها الخارجي مثاليًّا، وقد نجحت وصفة العائلة القديمة.

كانت لحظة الحقيقة تكمن في الخطوة التالية: هل ستحتفظ المفاجأة الموجودة داخل البسكويت بشكلها أيضًا؟ بمجرد أن بردت قطع البسكويت، قضم فرانتس أول قضمة بتلهف، ورفع قطعة البسكويت إلى أعلى ليراها الجميع. لقد نجحت التجرِبة! داخل قطعة البسكويت، حسبما حددت مواصفات المشروع والهندسة الداخلية المعقدة للبسكويت، كان حرف «سي» واضحًا تمامًا بعد أن كشفته القضمة الأولى.

يمكن أن تكون السوق التِّجارية المحتملة لقطع البسكويت بنص مطبوع ومخصص ضخمة؛ فيمكن أن تصبح قطع البسكويت المطبوعة وسائل لتوصيل معلومات سرية ذهابًا وعودة. وربما تساعد طباعة كلمة مرور جديدة داخل مجموعة من قطع البسكويت الطازجة موظفي قسم تكنولوجيا المعلومات في تهدئة العملاء في الشركات التي تفرض تغيير كلمات مرور أجهزة الكمبيوتر.

## (٤-١) عالمان مبدعان يطبعان معادلة رياضية سكرية عملاقة

لا تستخدم كل طابعات الطعام الرخيصة فوهة طباعة. ابتكرت لينور إيدمان ويندل أوسكاي — مؤسسا شركة صغيرة مبتكرة بنحو لا يهدأ تسمَّى «إيفل ماد سيانتيست» — طابعة ثلاثية الأبعاد تُدعَى كاندي فاب تستخدم مِدفعًا حراريًّا لصهر السكر الخام وتحويله لأشكال دقيقة التصميم وصلبة للغاية. كان هدف تصميمهما هو صنع طابعة طعام قليلة التكلفة يمكنها استخدام مواد رخيصة قابلة لإعادة التدوير.

استلهمت لينور ويندل تصميمهما من الطابعات الصناعية الثلاثية الأبعاد التي تستخدم الليزر أو مصدر ضوء لتصليد مسحوق البوليمر أو المعدِن. تستخدم كاندي فاب مِدفعًا حراريًّا لصهر السكر أو ما يسميه مخترعاها «إذابة وتصليد انتقائيان بالهواء الساخن» لصهر السكر الخام. تمتلك طابعات كاندي فاب مظهرًا خشنًا يشبه الصخر أو ما يمكن أن يصفه أي تقني بشكل «منخفض الدقة». تستخدم هذه الطابعة برنامجًا مفتوح المصدر وآخر تجاريًّا للقيام بعملها.

صنعت لينور ويندل طابعة كاندي فاب من أشياء شائعة الاستخدام في المنازل؛ فالمِدفع الحراري لصهر السكر كان أداة تسخين هوائي بعشرة دولارات، وهي ما وصفها ويندل على الإنترنت بأنها «الشقيقة الصغرى للسخان الذي يحتويه مجفف الشعر». لقد وصلا هذه الأداة بمِروحة تبريد للتحكم في درجة حرارة السكر خلال عملية الطباعة. بعد ذلك، وصلا ما ابتدعاه بنظام ميكانيكي معاد تدويره من راسمتين قديمتين من نوع إتش بي، ثم صنعا جسم الطابعة من الصناديق الخشبية المغطاة بقطع قماش سميك خيطت ببعضها بآلة خياطة منزلية.

أحد أفضل الأجزاء المحبَّبة إليَّ في القصة هو عملية اختبار طابعة كاندي فاب. لاختبار دقة وحركة المِدفع الحراري، وضعت لينور ويندل قطعة من الخبز تحت المِدفع على سرير الطباعة. أدركا أنهما نجحا عندما حمَّص المِدفع الحراري ببطء الجملة التي يستخدمها



مدفع حراري يكرمل السكر لتشكيل تركيبات ثلاثية الأبعاد من دون الحاجة لأي تجميع (الصورة مهداة من ويندل إتش أوسكاي، www.evilmadscientist.com).

مطورو البرمجيات حول العالم عندما يصنعون تطبيقًا جديدًا، والتي ترجمتها: «أهلًا بالعالم».

## (٢) إدخال القياس الكمي للذات

إن طابعات الطعام الدقيقة هي أجهزة الإنتاج المثالية لعصر يزداد فيه ارتباط النظام الغذائي والصحة والطب بالبيانات. مهدت المستشعرات القليلة التكلفة، وأدوات التقييم عبر الإنترنت، واختبار الحمض النووي قليل التكلفة، واختبارات التشخيص الطبية المتطورة بنحو كبير الطريق لحركة جديدة فيما يتعلق بالوعي بالجسد؛ وهي القياس الكمي للذات أو «معرفة الذات باستخدام الأرقام». فيمكن لخراطيش الطعام المطبوع بنحو ثلاثي الأبعاد أن تكون وسيلة لإتاحة الطعام للعدد المتزايد من الناس الذين يُحصون ويُسجلون ويُحللون كل قياس حيوي يحصلون عليه.

تُعتبر أجسادنا الهدف لعمليات جمع بيانات تتزايد تعقيدًا. يربط المتحمسون للقياس الكمي للذات أجهزة مراقبة إلى أجسادهم لحصر المسافات التي يمشونها وعدد دقات قلوبهم وأوزانهم والسعرات الحرارية التي تحرقها أجسادهم وكم الراحة التي يحصلون عليها في نومهم. تخيَّل هذا العالم الناشئ لبيانات القياس الحيوي ممزوجًا بالرعاية الطبية المتخصصة ومرتبطًا بطابعة طعام منزلية يتم التحكم فيها رقميًّا.

من السهل تخيُّل طابعة طبية ثلاثية الأبعاد تصنع النسخة المستقبلية من الجرانولا أو قطع الحلوى المعززة دوائيًّا. على الرغم من ذلك، يمكن أن تكون الطابعة أكثر استجابة من هذا؛ فيمكن تحديث الطابعة الثلاثية الأبعاد المنزلية على مدار الساعة بالمشكلات الطبية لصاحبها، ويمكنها استخدام ذكائها الرقمي في خلط ومزج المكونات الخام لطباعة وجبات مصنوعة حسب حاجات أصحابها اليومية.

على مدار الجزء الأكبر من تاريخ البشرية، كانت مراقبة المقاييس الحيوية للإنسان عملية بدائية إلى حد ما؛ فالناس يُحصون نبضات القلب ومعدل التنفس، ويفحصون سطح اللسان أو شكل ورائحة الفضلات، أما الآن فهناك تقنيات طبية جديدة تمكِّن الناس غير العاملين في المجال الطبي من تتبُّع ومراقبة وحتى توقع ما سيحدث لأجسادهم. هناك مجالات أخرى تغيرت بفضل الكميات المتزايدة من البيانات والقدرة الحاسوبية والإنترنت المتاحة، ويمكن للناس توقع والتحكم في الأسباب التي لا تعتمد على الحدس؛ على سبيل المثال، بين أنماط النوم في الأسبوع الفائت والدخول في حالة اكتئاب في نهاية الأسبوع الحالي.

أول مرة سمعت فيها عن حركة «القياس الكَمي للذات»، كنتُ أتناول الإفطار مع صديقة قديمة لي تعيش في مِنطقة خليج سان فرانسيسكو. انضمت لنا صديقة لها، وكانت امرأة تؤسس شركة جديدة تتضمن منتجاتها تطبيقًا للإنترنت، يتيح للناس تحميل وتحليل البيانات الخاصة بأجسادهم. وبينما كنت جالسًا أرتشف القهوة في سعادة وأتناول اللحم المقدَّد، استغرق الأمر بُرهة لألاحظ أن رفيقتيَّ من الساحل الغربي كانتا تتناولان شايًا أخضر منزوع الكافيين وأومليتًا مصنوعًا من بياض البيض.

تركَّز نقاشنا على موقع كان يُعتبر تجمعًا على الإنترنت يسجل فيه الناس ويدونون ويتحدثون حول بيانات قياساتهم الحيوية. يسجل مستخدمو الموقع معدلات النبض وما تناولوه للطعام ذلك اليوم ومستويات التدريب البدني. بعض المستخدمين كانوا يُحَمِّلون قراءات سكر الدم على الموقع، بينما قام آخرون بتقييمات ذاتية نفسية عبر الإنترنت أو إدخال ما يتناولونه من أدوية.

خلال نقاشنا، أدركت أن طابعة الطعام ستكون تقنية الطعام المثالية في الحِقبة الرقمية؛ فيمكن لمرضى السكر تحميل قراءات سكر الدم ليحسب برنامج الطابعة التوازن الغذائي المناسب لوجبتهم التالية، ويرسل وصفة الطعام المناسبة لطابعة الطعام الثلاثية الأبعاد خاصتهم التي تقبع في المطبخ، ويمكن لمستخدمي الطابعة من أصحاب الوعي الصحي طباعة توست الإفطار بعناصر غذائية مختارة وممزوجة سلفًا داخله.

إن طباعة الطعام القائمة على حصر البيانات تتيح للناس تعديل وصفات الطعام لتحتوي على مزيج خاص من العناصر الغذائية لحصة معينة من الطعام. يمكن لبيانات القياس الحيوي، إلى جانب استخدام طابعة ثلاثية الأبعاد موصلة بشبكة، مساعدة الناس في استهلاك الطعام بنحو معتدل بحيث تعكس مستويات نشاطهم في ذلك اليوم، ويمكن لطابعات الطعام مساعدة من يعانون من زيادة في الوزن في الابتعاد عن تناول الطعام المُصنَّع المُنتَج بكَميات ضخمة وتنوع محدود وفترة صلاحية غير محدودة، والتحول إلى وجبات مطبوعة صحية وطازجة.

يمكن لأي طاهٍ متخصص في إنتاج الطعام بطابعة ثلاثية الأبعاد أن يطبق نظامًا تأديبيًّا صارمًا؛ فمن فوَّت تمارين الركض الصباحية من الكسالى مدمني التلفزيون لن يحصل على قطعتي البيتزا المطبوعة اللتين طلبهما؛ بل ستطبع له الطابعة، بعد قراءة المقاييس الحيوية خاصته، طَبقًا من سلطة سيزر طازجة وقطعة من الخبز المصنوع من القمح الكامل.

يُعتبر عملاق صناعة البرمجيات وعبقري الرياضيات، ستيفن وولفرام، من الجامعين القدامى الدءوبين للبيانات الشخصية؛ وقد كتب على مدونته على موقع شركته قائلًا: «بدأت هذا منذ وقت طويل لأنني كنت دائمًا من المهتمين بالبيانات، وقد افترضت بالفعل أن كثيرًا من الناس يقومون بهذا أيضًا لكن اتضح أنه لا يوجد الكثيرون ممن يجمعون البيانات؛ ولذا فإنني الآن أمتلك على الأرجح إحدى كبريات مجموعات البيانات الشخصية في العالم.»[3]

يدون وولفرام عاداته اليومية بدقة شديدة. ولعقود، كان يحتفظ بسجلات لعدد ضربات لوحة مفاتيح الكمبيوتر التي قام بها يوميًّا، وعدد الخطوات التي مشاها وعدد الساعات التي قضاها نائمًا أو يتحدث في الهاتف. كتب ستيفن يقول: «يوميًّا — كممارسة للوعي الذاتي — أمتلك أنظمة أوتوماتيكية ترسل إليَّ بضع رسائل بريد إلكتروني عن اليوم الذي سبقه.»

يُعتبر وولفرام أحد رواد تحليل البيانات. على الرغم من ذلك، وبتزايد انجذاب الناس لتحليل بياناتهم الشخصية، ستصبح عادات وولفرام هي النمط السائد. وتنمو حركة القياس الكمي للذات بنحو سريع؛ فمن ناحية، هي تتعلق بالتكنولوجيا — تحليل الحمض النووي والمستشعرات والأدوات التحليلية، ومن ناحية أخرى، هي تتعلق بعلاقة الشخص بجسده.

سيفتح إنتاج الطعام الدقيق متعدد المواد الخام بمساعدة الكمبيوتر وبيانات القياسات الحيوية آفاقًا صحية جديدة؛ فطابعة الطعام الثلاثية الأبعاد — المزودة بمواد خام معدلة بدقة لتلبي احتياجات أجسامنا — ستقرأ الإشارات اللاسلكية بنحو فوري من مستشعرات موصلة بأجسادنا. ومثل طاهٍ واختصاصي تغذية خاص في نفس الوقت، فإن طابعة مطبخك الثلاثية الأبعاد ستطبع لك الوجبة المثالية مؤقتة بالدقيقة التي تدخل فيها من باب المنزل؛ فهي ستقرأ بيانات نظام تحديد المواقع العالمي الخاص بسيارتك حتى تدرك إذا كنتَ عالقًا في الزحام المروري أو ما زالت تعمل لوقت متأخر.

## (٣) الطعام المُصَنَّع

تثير طباعةُ الطعام المخصص — حتى لو كان طعامًا صحيًّا ومُحسَّنًا غذائيًّا — أسئلةً فلسفية، وتُحرك عواطف الناس؛ فالطعام المطبوع بنحو ثلاثي الأبعاد يُعتبر طعامًا مُصنَّعًا. ومثل الطباعة الحيوية وهندسة الأنسجة ومعجلات الجسيمات، يمكن النظر إلى طباعة الطعام على أنها هجوم مباشر على الطبيعة.

غالبًا ما يُلام الطعام المصنَّع — وهو لوم مستحق — للمساهمة في الإصابة بأمراض العصر الحديث: السمنة والسرطان وأمراض القلب. في الدول النامية، يشير منتقدو الطعام المصنَّع إلى أن الطعام المُصنَّع بكميات كبيرة والمستورَد من أماكن بعيدة قضى على الطرق التقليدية في صناعة الطعام الأقل ضررًا بالبيئة والأعلى في القيمة الغذائية. وتُعتبر الدهون المتحولة والحبوب المقشورة والمِلح الزائد وشراب الذرة عالي الفركتوز، من الأطعمة المتهمة عندما يتعلق الأمر بالحفاظ على جسد رشيق صحيح التغذية.

الطعام المصنَّع المنتج بكميات كبيرة يتعرض للتلوث البكتيري بنحو كبير، وساهمت سلاسل الوجبات السريعة في إمراض أعداد كبيرة من الناس بتقديم لحم ملوث لهم. ويحتوي الطعام المصنَّع عادة على عشرات المكونات الصناعية التي تعطي الطعام القوام والطعم، وتحفظه أو تحليه أو تقوي نكهته بنحوٍ ما.

أسوأ ما في الأمر أن الطعام المصنَّع يمكن أن يكون سيئ المذاق. صحيح أن رقائق البطاطس لذيذة المذاق، لكن لا توجد مقارنة بين ثمار الخوخ المُنتَجة بكَميات كبيرة والتي تُباع في متجر للبقالة، وبين ثمار الخوخ الطازجة التي قُطفت للتوِّ لتُباع لدى أكشاك الفاكهة على جانب الطريق في نيوجيرسي في شهر يوليو.

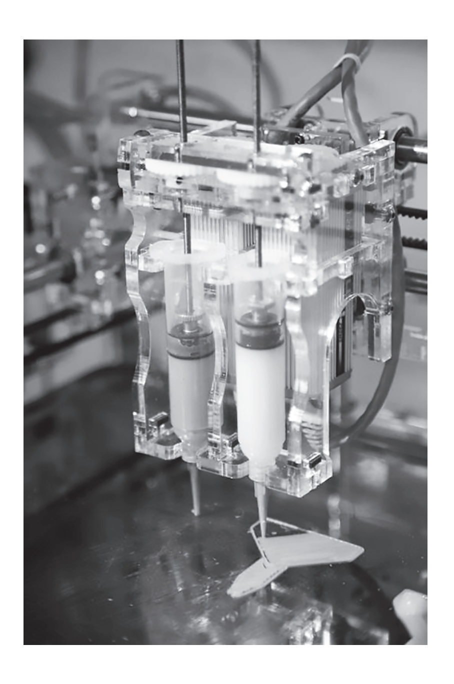
لا عجب أن الناس عادةً ما ترتعد أو تسخر عندما تسمع عن الطعام المطبوع بنحو ثلاثي الأبعاد. عبَّر مقال في مجلة «ريدرز دايجست» الشهيرة والمقروءة على نطاق واسع في الولايات المتحدة، ببلاغة عن الجوانب السلبية للطعام المُصنَّع قائلًا:

> لسوء الحظ فإن معظم الطعام المصنَّع مثقل بالمُحلِّيات والمِلح والنكهات والدهون الصناعية والألوان والمواد الحافظة والمركبات الكيميائية التي تغير القوام، لكن المشكلة ليست فقط فيما أُضيف له، بل ما نُزع منه؛ فعادةً ما تُنزع من الأطعمة المصنَّعة المكونات الغذائية المصمَّمة بنحو طبيعي لحماية قلبك؛ مثل الألياف القابلة للذوبان في الماء ومضادات الأكسدة والدهون «المفيدة»، أضف إلى هذا المضافات الغذائية، وسيكون لديك وصفة لكارثة.[4]

إن إدراك أضرار الطعام المصنَّع ليس أمرًا جديدًا؛ ففي مدينة باتل كريك بولاية ميشيجان الأمريكية في أوائل القرن العشرين، كان الناس يذهبون إلى مِصَحَّة باتل كريك لعلاج مشكلاتهم الصحية. أسس الأخوان كيلوج المِصحة، وأصبحا فيما بعد — من قبيل المفارقة — ثريَّين بسبب بيعهما لحبوب الإفطار خاصتهما، وهي أكثر الأطعمة المصنَّعة انتشارًا.

كانت مِصحة باتل كريك تقدِّم ما كان في ذلك الوقت يُعتبر أسلوبًا جديدًا وثوريًّا للعلاج. كان المرضى يتناولون أطعمة قليلة الدهون والبروتين، ويمارسون تدريبات رياضية قاسية. نصح الأخوان كيلوج نزلاء مِصحتهما قائلين: «إذا كنتم تريدون علاج ما يُمرضكم، فكلوا مثل الشمبانزي.»

في الواقع، وفيما يتعلق بالنظام الغذائي، فإن الأخوان كيلوج كانا محقَّيْن في نصح المرضى بالأكل مثل الشمبانزي. على الرغم من ذلك، فإن البشر — عكس قرود الشمبانزي — لا يقدِرون على تناول الطعام الطازج المجموع من البيئة مباشرة؛ إذ تقضي تلك القرود ساعات يوميًّا في مضغ ما تجمعه من طعام للحصول على العناصر الغذائية التي تحتاج إليها.



الطباعة باستخدام الكرفس ومحار الإسقالوب (الصورة مهداة من دانيال كوهين والطاهي ديف أرنولد، معهد الطهي الفرنسي، نيويورك).

وعكس ما يظنه الكثير من الناس، فإن الطعام المصنَّع سبب رئيسي في أن البشر في العصر الحديث يعيشون حياة طويلة وصحية، ويستمتعون بوقت فراغهم. في أحد المقالات في مجلة «أوتنه ريدر» تتساءل ريتشيل لودان، مؤلفة كتاب «في مدح الأطعمة السريعة»، عما سمته ب «اللاضية الغذائية». أدى الطعام المصنَّع إلى تحسين رفاهية الإنسان بنحو كبير؛ فقد قللت طرق تصنيع وحفظ ونقل الطعام من سوء التغذية، وأتاحت للناس الوقت الكافي للقيام بأنشطة أخرى.

تقول لودان إن «الماضي المشرق للاضيين الغذائيين لم يوجد من الأساس؛ لذا فإن معتقدهم الثقافي ليس قائمًا على التاريخ بل على حكاية خيالية.»[5] تتيح تقنيات صنع الطعام التحرر والصحة؛ فالثلاجة، التي كانت يومًا تقنية جديدة ثورية، تحافظ على الطعام طازجًا لفترات أطول، كما أن الأسمدة الزراعية توافر الطعام بكَميات أكبر.

تسرد لودان الفوائد التي غالبًا ما تُهمَل أو يُتغاضى عنها للطعام المُصنَّع قائلةً: «أكَّد عالم الغذاء العصري ما كان يُراد الحصول عليه: طعامًا معالجًا ومحفوظًا وصناعيًّا وجديدًا وسريعًا؛ طعام النخبة بسعر متاح لأي شخص. عندما أصبح الطعام الحديث متاحًا، ازداد الناس طولًا وقوة وعاشوا لفترات أطول.»[6]



محار إسقالوب مقلي مطبوع بنحو ثلاثي الأبعاد (الصورة مهداة من دانيال كوهين والطاهي ديف أرنولد، معهد الطهي الفرنسي، نيويورك).

تُوفِّر طرق الحفاظ على الطعام مثل التخليل والتقديد والتعليب والتغليف المفرغ من الهواء، طعامًا مصنَّعًا مغذيًا ويمكن نقله وتخزينه، كما يتيح الطعام المصنَّع الغذاء للناس الذين يعيشون بعيدًا عن مصدره، كما أن الطعام المصنَّع أقل عرضة للتلف، ويمكنه السفر بعيدًا عن مصدره الأصلي، ويتيح للناس أطعمة كانت قبل ذلك حكرًا على الطبقة الأرستقراطية فقط.

سيتيح المطبخ الرقمي أو طباعة الطعام — مثل أي تقنيات أخرى لإنتاج الطعام — فوائد اجتماعية وصحية جديدة، وستتيح بيانات القياسات الحيوية وقوة أجهزة الكمبيوتر صنع تكوينات من المواد وأشكال جديدة للطعام، وستؤدي طباعة الطعام إلى ظهور جيل جديد من الطعام المصنَّع يتميز بأنه مغذٍّ ورخيص وطازج ولذيذ.

## (٣-١) من الطعام المُصنَّع إلى الطعام الصناعي

إذا كان الطعام المصنَّع مثيرًا للجدل، فماذا عن الطعام الصناعي بالكامل؟ أستخدمُ مصطلح «طعام صناعي» هنا لأعني به الطعام الصالح للأكل والمغذي، بل واللذيذ، لكنه لم يُصنع من المكونات الأساسية التي يعتبرها معظمنا طبيعية أو يميزها من الأساس.

هناك طريقتان لطباعة الطعام الصناعي بنحو ثلاثي الأبعاد؛ الأولى مباشرة نسبيًّا وهي مزج معجون نوع مألوف من الطعام، مثل الإسقالوب بالثُّوم على سبيل المثال، وطباعته بنحو ثلاثي الأبعاد على هيئة جديدة. الطريقة الثانية، وهي الطريقة الأكثر مستقبلية في طباعة الطعام، وهي مزج معجون المكونات الأساسية الكيميائية، واستخدام وصفة رقمية لطباعة المادة الغذائية الخام بنحو ثلاثي الأبعاد لتخرج بأشكال تحاكي الطعام «الحقيقي».

إذا فككت أي طابعة تعمل بالليزر، فربما تتذكر أن ثلاثة ألوان أساسية فقط للحبر — السماوي والأحمر الأرجواني والأصفر — يمكنها صنع نطاق عريض من الألوان المختلفة، وبمزج بضعة ألوان أساسية معًا بنسب محددة بدقة، يمكن لطابعة الليزر صنع مستند ملوَّن وجذاب المنظر، وعندما تُطبق فكرة طباعة الألوان هذه في عالم المكونات الغذائية، فسيُتاح عالم جديد بلا حدود من الاحتمالات لصنع الطعام. وباستخدام القليل من المكونات الأساسية للطعام، يمكن لطابعة الطعام المستقبلية مزج المواد الخام بتركيبات جديدة ومختلفة لصنع عدد لا نهائي من أنواع الطعام الجديدة والمتنوعة.

يومًا ما، سنتمكن من طباعة مكونات غذائية صناعية لتشبه الأطعمة المفضلة المألوفة؛ مثل سمك السلمون المشويِّ والبطاطس المهروسة والبروكلي، وسنطبع السمك واللحم الصناعيَّين للحفاظ على البيئة من الإفراط في الصيد والتكلفة البيئية الكبيرة لتربية الأبقار من أجل اللحم، ويمكن للوجبات الصناعية القابلة للطباعة تغذية الجنود في الظروف الصعبة، كما يمكن لتجمعات اللاجئين الحصول على الطعام المطبوع الذي لا يفسد ويسهل حمله نسبيًّا.

يعاني كوكبنا للتغلب على مشكلتي الزيادة السكانية والطلب المتزايد على اللحم. أحد أكبر مَصدرَيْن للطعام يتوافران بكثرة على كوكب الأرض هما الحشرات والطحالب. في العديد من البلاد، يشوي الناس الجراد واليرقات، لكن الغرب غير مستعد لتناول الحشرات.




مكونات غذائية أساسية مصفوفة من أجل تجرِبة لطباعة الطعام (الصورة مهداة من كوهين وليبتون وكاتلر وكولتر وفيسكو، جامعة كورنيل).

يروج عالمان في علم الحشرات في إحدى الجامعات الهولندية، وهما مارسيل ديك وأرنولد فان هويس، للحشرات كغذاء؛ ففي مقال في صحيفة «ذا وول ستريت جورنال»، أشادا بفوائد تناول «الوجبات سداسية الأرجل»:

> الحشرات غنية بالبروتين وفيتامين «ب» والمعادن مثل الحديد والزنك، كما أنها قليلة الدهون. وتربيتها أسهل من تربية الماشية، وتُنتج فضلات أقل، كما أنها تتوافر بكثرة. ومن بين كل فصائل الحيوان المعروفة، هناك ٨٠ بالمائة تمشي على ستة أرجل؛ وحُدد أكثر من ألف نوع منها صالح للأكل. ماذا عن الطَّعم؟ غالبًا ما يوصف بأن طعمها يشبه طعم المُكسَّرات.[7]

بعض المطاعم في هولندا وضعت الحشرات على قوائم الطعام (عادة الجراد ويرقات الخنافس) لكنها لم تكتسب جاذبية كبيرة بعدُ؛ فربما لن يُقبل الناس على تناول خنفساء

كاملة مشوية للتوِّ؛ لكن إذا طحنت أجزاء الحشرات ونثرتها داخل أنواع مختلفة وملونة من الجل، فيمكن طباعتها على شكل كرات لحم لذيذة.

عندما كان دان كوهين لا يزال طالبًا بالدراسات العليا، بحث في أطروحته إنتاج الطعام الصناعي أو ما وصفه بـ «أسلوب تصميم الطعام من أسفل إلى أعلى». درس دان الهندسة وليس الطهي. وليبدأ مغامرته في عالم طباعة الطعام الصناعي الثلاثية الأبعاد، كانت أول محطة له على الجانب الآخر من الشارع في كلية إدارة الفنادق والضيافة الشهيرة التابعة لجامعة كورنيل؛ وذلك حتى يستعين ببعض الطلاب المهرة في الطهي الراقي لكي ينضموا إلى فريق المشروع.

كان دان يهدف إلى صنع العديد من أنواع الطعام المختلفة من أقل عدد ممكن من المكونات الخام للطعام، وكانت هذه مشكلة خاصة بالاختيار الأمثل؛ أي صنع أكبر عدد من التركيبات بعدد قليل من المكونات الأساسية. على العكس، فإن طلبة الكلية كان لديهم منظور آخر؛ فقد اجتذبهم التحدي الذي كان مرتبطًا بمقرر عن محسنات الطعام الصناعي كان عليهم اجتيازه.

شرع دان وفريقه في مزج المكونات الأساسية للطعام بنحو منهجي لإنتاج أكبر عدد من التركيبات التي يمكنهم الإتيان بها. طبعوا مجموعات مختلفة من النكهات والألوان والألياف الصناعية والمكملات الغذائية وعوامل الحفاظ على القوام، كما مزجوا كَميات متعددة من أنواع مختلفة من الجل والعلكة. ومثل أقزام الأومبا لومبا العاملين في مصنع ويلي وونكا للشكولاتة في رواية الأطفال الشهيرة، قام الطلاب بتجارِب عديدة لطباعة الطعام. وكان دان يُريني كلَّ يوم أنواعًا جديدة من الطعام الصناعي التي تشبه اللبن لكنها مُشكَّلة على شكل المكعبات الطرية أو عيش الغراب والتي كانت بنِّية اللون لكن مذاقها يشبه الموز.

حقق المشروع نجاحًا مدوِّيًا من منظور هندسة الطعام، لكنه حقق فشلًا مدوِّيًا كأسلوب للطهي؛ فقد كان الطعام الصناعي صالحًا للأكل، وحتى طعمه لم يكن سيئًا. لكنه كان غريبًا للغاية؛ فلم يُرِد أحد — حتى الطلاب الذين شاركوا في المشروع — تذوُّقه، عوضًا عن طلبه في أي مطعم أو شرائه من أي متجر للبقالة.

أثبت مشروع هندسة الطعام الخاص بدان أن تصنيع الغذاء علم وفن في آنٍ واحد. فلا يمكن تَوَقع مدى تقبُّل المستهلكين للطعام التجاري الصناعي. والسر في ذلك أن يكون الطعام الصناعي سهلًا في التعرف عليه؛ فالحلوى التي هي بنكهة الفراولة يجب



خبز ذرة مطبوع بنحو ثلاثي الأبعاد على هيئة أخطبوط (الصورة مهداة من جيفري ليبتون، جامعة كورنيل).

أن تكون حمراء، كما يجب أن يكون شكل ومذاق وملمس لحم الدجاج المصنوع من البروتين الصناعي كالدجاج الحقيقي. وعندما تظهر منتجات الطعام الصناعي المطبوع بنحو ثلاثي الأبعاد في أسواق الطعام، ستحتاج إلى أن تبدو كطبق جميل المنظر من لفائف السوشي أو لحم البط المشوي.

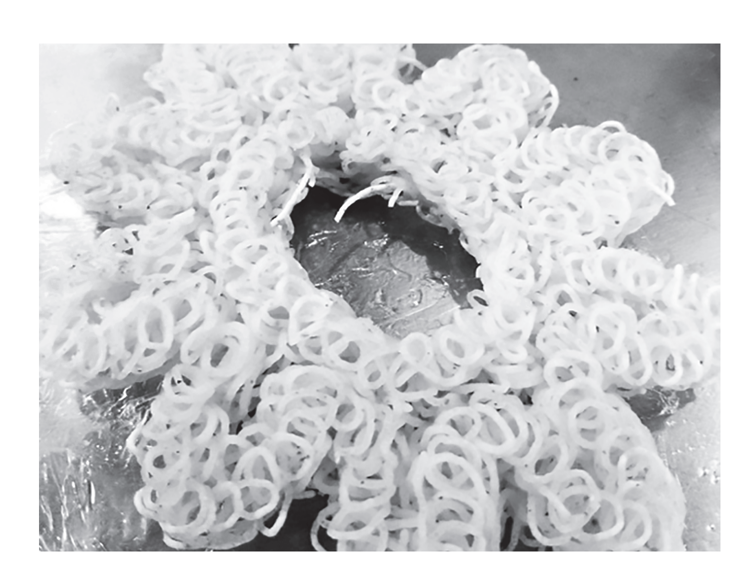
من الصعب طباعة طعام صناعي يبدو «حقيقيًّا»، كما أن طباعة الفاكهة والخَضراوات الصناعية أكثر صعوبة. وتشبه تحديات طباعة طعام طازج أو طبيعي تلك التي يواجهها باحثو الطب الذين يحاولون طباعة أنسجة حية؛ فالأطعمة الطبيعية مصنوعة من مزيج معقد من العناصر الكيميائية والمواد الأخرى التي يتفوق تصميمها وتركيبها على التقنيات التي نمتلكها حاليًّا.

## (٣-٢) التطبيق القاتل للطباعة الثلاثية الأبعاد

ستُغير الطباعة الثلاثية الأبعاد للطعام طريقة تناولنا للطعام واهتمامنا بصحتنا، وعندما يتقبل الناس المطبخ الرقمي على نطاق واسع كأجهزة الكمبيوتر الشخصية اليوم، فإن الثلاجات في بيوتنا ستحتوي على خراطيش من المعاجين المجمدة للشكولاتة الداكنة أو

دجاج البيستو، وسيُنزل هواة الخَبز وصفات الكعك ويطبعون معجنات شهية وفريدة، تضاهي في تعقيدها تلك التي يصنعها الطهاة المحترفون. وستمتلك طابعات الطعام المنزلية الإعدادات التي تتيح للطهاة اختيار قوام وصلابة الطعام، وربما كتابة رسالة خاصة داخل الطعام تنكشف من القضمة الأولى. والعشاق أو أفراد العائلة الواحدة البعيدون عن بعضهم سيتشاركون وصفة لنفس الكعكة التي سيطبعونها ويتناولونها معًا أثناء تبادل الحديث عبر كاميرا الويب.

أنا غير مقتنع بالكامل بأن كلَّ منزل سيمتلك يومًا ما طابعة ثلاثية الأبعاد، لكن لو سأراهن على نوع تقنيات الطباعة الثلاثية الأبعاد الذي سيسود استعماله في البيوت؛ فسيكون رِهاني على طباعة الطعام. تُذكِّرني طباعة الطعام بالأيام الأولى لأجهزة الكمبيوتر الشخصية، عندما بدتْ ألعاب الفيديو في البداية شيئًا تافهًا دفع الملايين لشراء أجهزة كمبيوتر شخصية؛ فربما تكون طباعة الطعام بالنسبة إلى الطباعة الثلاثية الأبعاد ما كانت عليه ألعاب الفيديو بالنسبة أجهزة الكمبيوتر الشخصية: النشاط غير المهم الذي أصبح «التطبيق القاتل».



عجينة ذرة مموجة مطبوعة على شكل وردة ولذيذة الطعم عند قليها (الصورة مهداة من جيفري ليبتون والطاهي ديف أرنولد).

الفصل التاسع

# مصنع داخل الفصل المدرسي

منذ بضع سنوات، دُعيت للتحدث عن الطباعة الثلاثية الأبعاد في فصل ابني الذي يدرس في الصف الثاني الابتدائي. وافقتُ على الفور، وأنا المعتاد على التحدث أمام طلاب الجامعات من دارسي الهندسة. قلت حينها لإيفان مالون، أحد طلابي في مرحلة الدراسات العليا آنذاك (الذي يمتلك الآن مركز تصنيع وطباعة ثلاثية الأبعاد في فيلادلفيا): «هذا يبدو رائعًا. إلى أي مدى يمكن أن يكون صعبًا؟»

في الأسابيع السابقة لليوم الذي كنت سأتحدث فيه، عرضت بعض الأفكار الخاصة بالطباعة الثلاثية الأبعاد من أجل العرض التقديمي على ولدي في المنزل، لكنه كان يرفض الفكرة تلو الأخرى. سألته: هل سيحب الأطفال العرض التقديمي عن الطباعة الثلاثية الأبعاد؟ لا. ماذا عن بعض الأفلام؛ عن الألعاب المطبوعة؟ أو شرح لاستخدام برامج التصميم؟ كان الرد سلبيًّا.

وبينما كان يقترب اليوم ولم تظهر أي أفكار جيدة، أحسست أنا وإيفان بمشاعر غير متوقعة من رهاب الجمهور. وأخيرًا، حضر الإلهام: ماذا لو استخدمنا صَلصال اللعب في الطباعة الثلاثية الأبعاد؟ فالأطفال يعرفون الصَّلصال، أليس كذلك؟

صممنا لُعبة على هيئة مكُّوك فضاء، حسب مخطط جيد كان لدينا، كان جسمها مطبوعًا من الصَّلصال الأحمر، والجناحان والذيل من الصَّلصال الأزرق. حل يوم العرض التقديمي أخيرًا، ووصلنا إلى الفصل حاملين طابعة فاب آت هوم، وكانت نموذجًا لطابعة ثلاثية الأبعاد صغيرة الحجم ومفتوحة المصدر طورناه في معمل البحوث خاصتنا. كانت الطابعة في حجم فرن المايكروويف، وجدرانها من البلاستيك الشفاف حتى يمكن للمشاهدين رؤية عملية الطباعة أثناء حدوثها. من أجل هذا العرض بالتحديد، أضاف

إيفان للطابعة فوهة طباعة أضخم من المعتاد حتى يخرج مكوك الفضاء بنحو أسرع، خلال ثلاث دقائق تقريبًا؛ أي خلال فترة انتباه الأطفال الصغار.

وضعت الطابعة على مِنصة عالية في الفصل، وكانت خراطيشها مملوءة بالصَّلصال الأحمر والأزرق. كانت الطابعة تقبع في مكانها في فخر، وهي محاطة بمجموعة من الطلاب الذي ينظرون بلهفة داخل حافظتها المصنوعة من زجاج الإكريليك. وبعد بعض الكلمات التقديمية للفصل، ضغط إيفان زر الطباعة، وبدأ رأس الطباعة في التحرك ذهابًا وعودة، مصدِرًا أزيزًا ليخرج ببطء الصلصال الأزرق والأحمر على شكل مكوك فضاء صغير حسب توجيهات ملف التصميم الحاسوبي.

تسمَّر الأطفال في أماكنهم.

وأمال بعضهم رءوسهم مع إيقاع رأس الطباعة المتحرك؛ بينما هَمْهَم البعض الآخر بصوت يحاكي صوت محرك الطابعة. وأخيرًا، وبعد مرور بضع دقائق، خرج مكوك فضاء مصغر من الصَّلصال، ونُزع من سرير الطابعة خاصته، ورُفِع عاليًا حتى يتمكن الطلاب من فحصه عن قرب.

تبدد الصمت المليء بالإعجاب مع تدافع الطلاب لاحتلال موقع قريب، وسألني أحد الطلاب عما إذا كان يمكننا تغيير شكل الجناح وطباعة المكوك من جديد، بينما سأل آخر إن كنا قد جلبنا الكثير من الصَّلصال بألوان مختلفة لطباعة المزيد من مكوكات الفضاء. وطرح طالب ثالث — بينما كان يحمل علبة صَلصال أتى بها من على أحد رفوف الفصل — عددًا تقريبيًّا لعدد المكاكيك التي يمكنه صنعها بعلبة صَلصال واحدة. وحسَبت طالبة أخرى ذات ولع بريادة الأعمال الأرباحَ التي يمكن أن تجنيها من بيع كل مكوك فضاء مقابل خمسة دولارات وشراء صَلصال لعب بأسعار السوق الحالية.

وحسبما يقول ديف وايت، أستاذ التصميم والتقنية في مدرسة كليفدون الثانوية بالمملكة المتحدة: «إذا كان يمكنك الاستحواذ على خيال طلابك، فتستطيع الاستحواذ على انتباههم.»

## (١) التعلم بالصنع: تدريس الهندسة للأطفال

تخيَّل أنك مدرس للصف الرابع الابتدائي، وتتساءل إن كانت برامج التصميم والطباعة الثلاثية الأبعاد يمكنها مساعدتك في تدريس أساسيات الفيزياء والرياضيات للطلاب؛

ستدرك أنك تحتاج إلى نقل بعض المفاهيم الرئيسية لهم مثل فكرة الطاقة الحركية وبعض النسب الرياضية البسيطة. يمكنك بالفعل تدريس كل هذا بواسطة عدد من الخُطط الدراسية الواقعية والمجربة الخاصة بأساسيات الرياضيات والعلوم، لكنك تود تجرِبة أمر مختلف لترى النتائج.

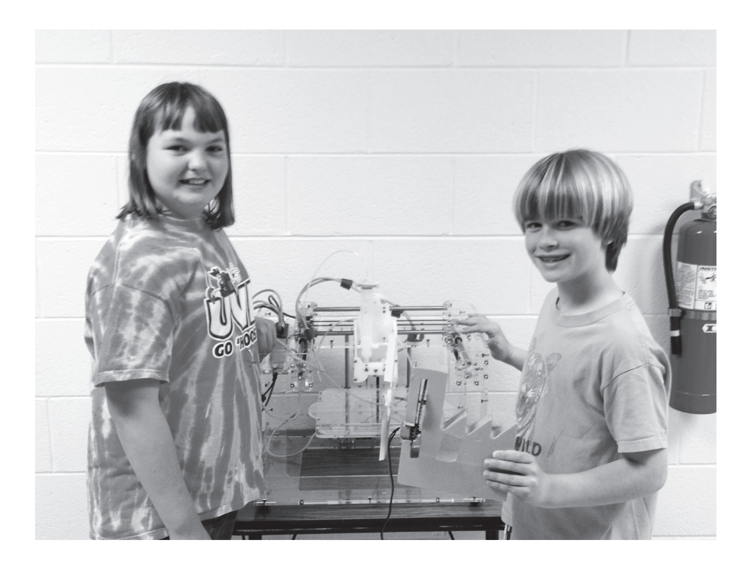
لا يدرك معظمنا أن ما يُدرس في المدارس الحكومية هو نتيجة عمل آلاف الأيدي الخفية؛ فالمسألة لا تقتصر على قيام مدرس المرحلة الابتدائية بتخيل ووضع خطط التدريس التي يظن أنها ستنال إعجاب الطلاب؛ بدلًا من ذلك، وعلى الأقل في الولايات المتحدة الأمريكية والعديد من الدول الغربية، فإن العالَم داخلَ الفصل يُعتبر نموذجًا مصغرًا حيًّا ينبض بالحياة، للعالم الأكبر الموجود خارج أسوار المدرسة.

تضع الولايات داخل الولايات المتحدة معايير للتعليم، كما يصنع مزيج من الخبراء والناشرين التِّجاريين جزءًا من المناهج الدراسية، كما أن الآباء والمديرين ومجالس إدارات المدرسة يمتلكون الكلمة الأخيرة فيما يُمثِّل التعليم الجيد. السؤال الآن: إذا كنتَ أنت المدرس، فمن أين ستبدأ؟

أحد الاحتمالات هو أنه يمكنك تبنِّي الأسلوب الذي يتبعه برنامج دراسي تجريبي يسمى «فاب آت سكول». يساعد هذا البرنامج المدرسين في صنع منهج دراسي يجمع بين التصميم والطباعة الثلاثية الأبعاد لتدريس المبادئ الأساسية للعلوم والرياضيات. وهو يهدف لصنع مهندسين صغار وزرع الحماس فيهم تجاه العلوم والرياضيات، وخاصة التصميم والهندسة. ويُموِّل هذا البرنامج مؤسسة العلوم الوطنية الأمريكية وشركة موتورولا ومؤسسة ماك آرثر، ويقود المشروع جلين بول، الأستاذ في مجموعة تدريس الهندسة للأطفال بجامعة فرجينيا.

تُطوِّر وتختبر خُططَ الدروس الخاصة بالمشروع مجموعةٌ من الأساتذة والمعلمين وأمناء المكتبات وطلبة الدراسات العليا. وحتى الآن، هناك حوالي ٣٥٠ طالبًا من الصفين الرابع والخامس، بالإضافة إلى عشرة مدرسين اختبروا المنهج بنحو واقعي.

ابتكر جلين وفريقُه خُطة درس تسمَّى «التعلم بالصنع»، ويحكي الدرس قصة طفل أفريقي يدعى ويليام، لا توجد بقريته كهرباء؛ لذا يفكر في طريقة لصنع توربين الرياح خاصته باستخدام بقايا جرار زراعي وخردة معدِنية وكتاب عن الطاقة. سيتتبع الطلاب قصة ويليام ويصممون ويختبرون ويطبعون بنحو ثلاثي الأبعاد توربينات الرياح




طالب وطالبة من مدرسة ابتدائية يعملان بطابعة فاب آت هوم الثلاثية الأبعاد. عُدلت الطابعة لتطبع الصلصال وتقطع الفوم وتقوم بعمليات تصنيع رقمية أخرى (الصورة مهداة من جلين بول من جامعة فرجينيا).

البلاستيكية خاصتهم، والتي تعمل الدائرة الإلكترونية بداخلها عندما توضع أمام مِروحة الفصل.

وبمساعدة نحو عشرين صفحة ملونة تحتوي على صور وأشكال تخطيطية تعليمية واضحة، يُجري الطلاب عددًا من التجارِب العملية المباشرة التي تعرِّفهم على مفاهيم مجردة؛ مثل الطاقة الحركية والتيارات الكهربائية ونسب سرعات التروس. في خطة الدرس هذه، يستعين الطلاب بآلة قطع ورق تعتمد على الكمبيوتر لصنع رِيَش توربين الرياح، وسيصنع الطلاب التروس البلاستيكية والقاعدة الخاصتين بالتوربين باستخدام طابعة فاب آت هوم الثلاثية الأبعاد.

سيعمل الطلاب في أزواج، ويبدأ الدرس كما يلي:

لديك الكثير من الأشياء الموصلة بالكهرباء في بيتك: ثلاجة وتلفزيون ومصابيح، وربما حتى أجهزة جذابة مثل الكمبيوتر أو الآي بود. تأتي الكهرباء التي

> تُشغِّل هذه الأشياء من محطات الكهرباء التي يمكن تشغيلها بالرياح أو الماء أو الفحم أو حتى الانشطار النووي.
>
> وتستمر القصة:
>
> لكن هل تعلم أنه من بين سبعة مليارات نسمة يسكنون كوكب الأرض، فإن ربعهم تقريبًا لا يحصل على كهرباء؟ هذا ما يساوي نحو ١٫٥ مليار نسمة! إذا أراد أيٌّ من هؤلاء ضوءًا في الليل، على سبيل المثال، فلا يوجد الكثير مما يمكنه القيام به للحصول عليه؛ إلا إذا حاول صنع الكهرباء الخاصة بهم تمامًا مثلما فعل طفل يسمَّى ويليام.

ومثلما سيخبرك أي مخترع، فإن ويليام يحاول ويفشل، ويحاول مرة أخرى، وأخيرًا يتوصل إلى التصميم الأمثل، وفي نهاية القصة «يبدأ توربين الرياح خاصته في الدوران ببطء في البداية، ثم تزداد سرعته وتبدأ الكهرباء في التدفق، ثم سرعان ما يرى الجيران بيت ويليام مضاءً، بأربعة مصابيح كهربائية، حتى في أكثر الليالي إظلامًا.»

في الفصل الذي زرته، شاهدت طالبتين تختبران توربينهما المطبوع بنحو ثلاثي الأبعاد أمام مِروحة الفصل. أخبرَتِ الطالبتان مدرسَهما أن توربين الرياح لم يكن يعمل؛ فقد اكتشفتا مشكلة بلوحة الدوائر الكهربائية به، وأوضحتا أنهما فككتاه، واكتشفتا أن هناك سلكًا موصلًا في المكان الخطأ. جربت الطالبتان هذه المرة شيئًا مختلفًا؛ ونجحتا، وأضاء المصباح الصغير بينما أخذت سرعة ريش التوربين في الازدياد.

لقد طبقت الفتاتان أسس الطاقة الحركية لتوليد الكهرباء، وقامتا بدور إيجابي في حل المشكلة التي صادفتْهما. وبعرض مشكلة التصميم الحالية على الطلاب، فإن خُطة الدرس تعرِّفهم بفكرة «معايير التصميم»؛ فهي تقدم معايير التصميم على أنها «مجموعة من القواعد التي تتَّبعها حتى تصنع الأشياء التي يمكن للناس أن يستخدموها ويسعدوا بها.»

شاهدتُ بعض الطلاب الآخرين يَبرعون في فهم مفهوم أساسي في الهندسة، وهو: عدد الدورات لكل دقيقة. أخبر طالب شريكه في التجرِبة بما يحتاجان إليه من أجل «معرفة عدد دورات توربينهما في الدقيقة». في وقت سابق، كان مدرسهم قد وضع ملصقًا لامعًا على كل ريشة للتوربين، وساعد الطلاب في إحصاء عدد دورات كل ريشة باستخدام عداد



توربين رياح كامل بتروس مطبوعة بنحو ثلاثي الأبعاد (الصورة مهداة من جلين بول جامعة فرجينيا).

دوران صغير، وبامتلاكهم لعدد دورات التوربين، لجأ الطلاب إلى طاولة للقيام بحسابات بسيطة لإحصاء عدد دورات الرِّيَش في الدقيقة.

بعد زيارتي لبضعة فصول تطبق برنامج فاب آت سكول، سألت جلين بول: لماذا تُعتبر التجارِب والخبرات المباشرة أداة تعليمية قوية هكذا. فسَّر جلين هذا قائلًا إن مجرد مشاهدة شخص آخر يحل مشكلات التصميم لا يساعد الطلاب في إتقان مبادئ العلوم أو الهندسة أو الرياضيات. يقول جلين: «لا تحوِّل أي عُدة رسم بالأرقام من يستخدمها إلى فنان، وهو نفس ما يحدث مع أي طفل يجلس ليشاهد طابعة ثلاثية الأبعاد وهي تعمل؛ ما الذي يتعلمه؟ لا شيء.»

الجميل فيما يتعلق بأسلوب برنامج فاب آت سكول هو أن برامج التصميم والطباعة الثلاثية الأبعاد ليستا نقطة تركيز خطة الدرس؛ بل هما تقنيتان تساعدان المدرسين والطلاب في اكتساب الإتقان عن طريق تطبيق مفاهيم مجردة لحل مشكلات مثيرة للاهتمام. وبانخفاض سعر برامج التصميم والطابعات الثلاثية الأبعاد حاليًّا، يمكن للمدرسين والطلاب تجرِبة عملية الهندسة والتصميم بنحو مباشر. في المستقبل، يخطط

جلين وزملاؤه لصنع العديد من خُطط الدروس المماثلة لخطة «التعلم بالصنع» ونشر برنامج فاب آت سكول في مدارس المراحل المتوسطة.

## (١-١) المرحلة الثانوية

تساعد الطابعات الثلاثية الأبعاد طلاب التصميم والهندسة في المرحلة الثانوية في الفشل على نحو أسرع. مهلًا، فهذا لا يبدو جيدًا! لكن في الهندسة وتصميم المنتجات والمهن الأخرى التي تتضمن حل المشكلات، كلما فشلت بسرعة، وصلت إلى الحل بنحو أسرع.

على سبيل المثال، تخيَّل كم سيكون الأمر مأساويًّا إذا لم تفشل مبكرًا مجموعة من المهندسين المدنيين، واكتشفوا بعد حفل الافتتاح الكبير بأسبوع واحد فقط أن تصميمهم لجسر معلق كان يحوي خطأً كارثيًّا. كانت ستتعرض حياة الكثيرين للخطر حيث سيتشقق الجسر وينهار، وكان سيتوجب بدء المشروع من البداية، وهو أمر مكلف ومدمر للمعنويات.

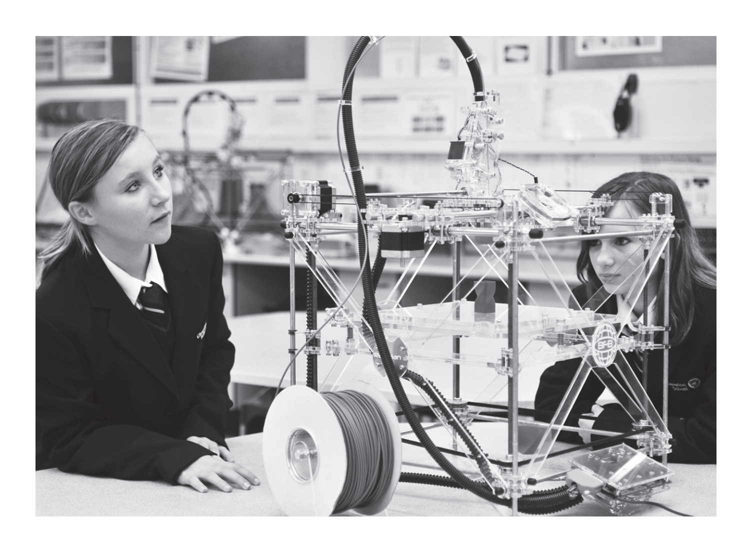
تساعد الطابعات الثلاثية الأبعاد الطلاب في الفشل مبكرًا وبنحو آمن؛ بفضل قيمتها كأداة سريعة لصناعة النماذج الأوليَّة. تقوم أي عملية تصميم تَكراري على اختبار المصممين لأفكارهم أثناء تطورها، وهو ما يشبه صناعة الكاتب لعدة مسَوَّدات محسَّنة من الكتاب حتى يصل إلى النسخة النهائية. يقول جيسي رويتنبرج، مدير البرنامج التعليمي في شركة الطباعة الثلاثية الأبعاد استراتاسيس، الواقع مقرها في مينيسوتا، إن الطلاب يجدون أن الطابعات الثلاثية الأبعاد الخاصة بالشركة مفيدة؛ حيث إنها تمكِّنهم من التعرف على أخطاء التصميمات مبكرًا، بدلًا من بذل الوقت والمواد الخام في مقامرة المحاولة الواحدة فقط.

عندما تحدثت معه على الهاتف لاكتشاف المزيد عن خط إنتاج استراتاسيس للطابعات المدرسية، قال جيسي: «عندما كنتُ أدرس الهندسة في المدرسة الثانوية، كان أحد المشروعات النمطية التي يكلفوننا بها هو بناء جسر من أعواد الأسنان والصمغ.» بمعنًى آخر، فإن صنع النماذج الأولية لم يكن جزءًا من عملية التصميم. وأكمل جيسي قائلًا: «مشكلة هذا أنك كنت تدرك في نهاية المشروع إن كان الجسر خاصتك سيفشل أم لا، وإذا فشل، لم يكن متاحًا بناؤه من جديد لمعرفة ماهية المشكلة وكيفية حلها.»

يُدرِّس ديف وايت، رئيس منهج التصميم والهندسة في مدرسة كليفدون الثانوية في المملكة المتحدة، التصميمَ والتقنية لطلاب المدارس المتوسطة والثانوية منذ ٢٥ عامًا. يمزح

ديف بشأن وجود طابعة ثلاثية الأبعاد في الفصل حيث يساعد هذا الطلاب في «التخلص من الأفكار غير العملية». ومنذ عامين، وضع ديف طابعة ثلاثية الأبعاد تِجارية في الفصل الذي يدرس فيه.

تعلمت من ديف أن الطلاب نادرًا ما يطبعون المشروع خاصتهم بالكامل بنحو ثلاثي الأبعاد. بدلًا من ذلك، فإن الطابعة الثلاثية الأبعاد عادةً ما تعمل كأداة دعم لمنتج أكبر وأكثر تعقيدًا، ربما يكون أجزاء روبوت أو جسم سيارة سِباق. يستخدم الطلاب الطابعة في الفصل لصناعة أجزاء مخصصة لا يمكنهم العثور عليها في أي مكان آخر.



طالبتان من المرحلة الثانوية في المملكة المتحدة تستخدمان طابعة «راب مان» ثلاثية الأبعاد (الصورة مهداة من ديف وايت، المملكة المتحدة).

يتطلب فصل التصميم الشهير الخاص بديف أن يصمم الطلاب ويطبعون بنحو ثلاثي الأبعاد جسمًا عاملًا يمكن للناس استخدامه. يقول ديف: «وجدت أن دفع الطلاب على تحويل تصميماتهم الرقمية إلى شيء ملموس يعلمهم الكثير. أي جسم يبدو رائعًا على شاشة الكمبيوتر عادةً ما يخرج من الطابعة بنحو مختلف عما كان محددًا له أو أكبر حجمًا أو أكثر قبحًا.»

وصف ديف تجرِبته مع أحد الطلاب الذي صمم حاملًا للآي بود يمكن تثبيته على مِقْود الدراجة. يقول ديف: «كان حامل الآي بود يبدو رائعًا على شاشة الكمبيوتر، لكن عندما طبعه اكتشف أنه ليس مناسبًا لِمقْود الدراجة — كان كبيرًا جدًّا وليس ملائمًا بما يكفي من الناحية الديناميكية الهوائية.» رجع الطالب للوحة الرسم الخاصة ببرنامج التصميم، وعدل التصميم ليصبح الحامل أكثر انسيابية وسهولة في الاستخدام.

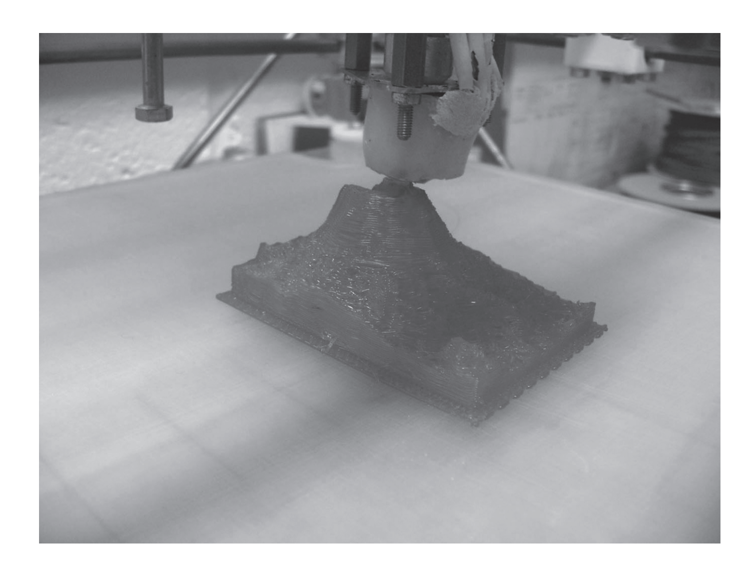
يقول ديف: «نشجع الطلاب على الإتيان بأفكار تصميمات مجنونة وجامحة يُمضون وقتًا طويلًا في صنعها يدويًّا فقط ليكتشفوا في وقت متأخر جدًّا أن تصميماتهم لا تصلح على أرض الواقع. بدلًا من ذلك، يجب أن يقوموا بتصميم تكراري يقوم على الاختبار والتحسين طَوال الوقت، ويجب على الطلاب تصميمه وطباعته وتجرِبته مرة تلو الأخرى.»

يتعاون ديف مع مدرسين يدرسون مناهج دراسية أخرى. يقول ديف إن هؤلاء المدرسين يجربون تطبيق برامج النمذجة الثلاثية الأبعاد واستخدام الطابعات الثلاثية الأبعاد لتعليم الطلاب تصميم وطباعة تركيبات الحَمض النووي أو نماذج للخلايا أو نسخ طبق الأصل من أجسام لها أهمية تاريخية. ويُعتبر مشروع حديث لطلاب في إحدى حصص الجيولوجيا مثالًا جيدًا على هذا.

في حصة للجيولوجيا، ساعد ديف الطلاب في تصميم رسم طوبوغرافي لبركان جبل سانت هيلينز قبل ثورانه عام ١٩٨٠. طبع الطلاب في البداية نموذجًا للبركان قبل الثوران ثم نماذج طوبوغرافية كاملة للبركان بعد الثوران بفوهة كبيرة في وسطها. يقول ديف: «بالنسبة إلى مناهج الفنون والعلوم الإنسانية، يمكن للطلاب تصميم وطباعة منحوتات فنية أو أبنية تاريخية.»

على الرغم من الخطاب المنمق عالي المستوى حولَ الدور المهم لتدريس التصميم والهندسة، فإن المناهج الدراسية الأساسية في كلٍّ من المملكة المتحدة والولايات المتحدة لا تتضمن تدريس مهارات التصميم أو الهندسة. وبينما هناك الكثير من المناهج المخصصة لتدريس العلوم والرياضيات، فإن الانتباه المخصص للهندسة قليل نسبيًّا ويتركز على التصميم والتركيب الاصطناعي؛ لهذا فإن المدارس الحكومية تواجه صعوبة في تبرير تمويل التقنيات اللازمة في ميزانياتها. ويجب على المدرسين الدفاع عن اختيار استخدام الطباعة الثلاثية الأبعاد وبرامج النمذجة الثلاثية الأبعاد داخل الفصول ضمن خطط التدريس خاصتهم.

في الولايات المتحدة، تمول وزارة الدفاع ووكالة مشاريع البحوث المتطورة الدفاعية برامج لتوفير الطابعات الثلاثية الأبعاد لمواقع التدريب الهندسي في المدارس المتوسطة



نموذج مطبوع بنحو ثلاثي الأبعاد لبركان جبل سانت هيلينز (الصورة مهداة من ديف وايت، المملكة المتحدة).

والثانوية المتخصصة، لكن وبالرغم من أهمية هذه البرامج التجريبية، فإنها تستبعد معظم المدارس الحكومية. ويجب على مدرسي المدارس الحكومية الذين لا تمولهم وكالة حكومية أو شركةٌ ما تجميع المصادر اللازمة للحصول على طابعة ثلاثية الأبعاد لفصولهم، والحصول على إذن لتكييف طريقتهم في التدريس.

الموقف مشابه في المملكة المتحدة؛ فلا تموِّل أي هيئة خارجية منهج ديف وايت للطباعة الثلاثية الأبعاد، ولا تمتلك مدرستُه الميزانيةَ اللازمة لتغطية هذه النفقات التقنية. في هذا الإطار، قال ديف ضاحكًا: «معظم الموارد التي جمعتها لفصلي الذي أُدرس له جمعتها بالاستجداء والاقتراض، لكن ليس بالسرقة بالطبع!» تبرعت شركة صغيرة تقع بالقرب من مدرسة كليفدون الثانوية تسمَّى بيتس فروم بايتس (والتي اشترتها مؤخرًا شركة ثري دي سيستمز) عن طِيب خاطر بطابعة ثلاثية الأبعاد شخصيةٍ من نوع راب مان للمدرسة.

على الرغم من ذلك، فإن ديف يخطط للمضي قُدمًا، وعن هذا يقول: «أقضي وقتي خارجَ الفصل في تطوير طرق للتدريس بهذه التقنيات الجديدة لأن هذا ما أومِن به. لم تَعُد المدارس قادرة على تعليم الأطفال كيف يصبحون نجارين أو سباكين؛ فيجب أن نعلمهم مهارات يمكنهم استخدامها في أماكن عملهم المستقبلية.»

## (٢) هذه ليست أزمة قومية ... لكن التعلم يجب أن يكون ممتعًا

في الولايات المتحدة، وفي كل بضعة عقود، واستجابةً لتهديد ملموس للأمن القومي، يعلن خبراء التعليم عن وجود أزمة في التعليم الحكومي؛ فهناك أزمة مرة أخرى في تعلُّم الرياضيات والعلوم والتكنولوجيا والهندسة. في خمسينيات القرن الماضي، كان هناك قلق عام في الولايات المتحدة بسبب أن عدد الطلاب الروس الذين تخرَّجوا من المدارس الثانوية الحكومية واتجهوا لدراسة الهندسة في الجامعة كان ضعف عدد الطلاب الأمريكيين من نفس المرحلة؛ كما أن عدد الطلاب الروس الذين أصبحوا تقنيين مهرة كان يزيد عن عدد نظرائهم الأمريكيين ثلاثين ضعفًا.[1]

اليوم، وبدلًا من «الخطر الأحمر» الروسي الذي ينتمي لحقبة الحرب الباردة، فإن الخطر الاقتصادي القادم هو الدول الصناعية ذات معدلات الأجور المنخفضة. إن المدارس الحكومية الأمريكية لا تخرِّج العدد الكافيَ من الطلاب الذين سيكبرون ليصبحوا علماء أو مهندسين. وتزعم تقارير عديدة جمعتها الوكالات الفيدرالية والتربويون والاقتصاديون أنه إن لم تطور المدارس الحكومية من طريقة تدريسها للعلوم والرياضيات، فإن أمريكا ستُسحَق في الساحة الاقتصادية.

إن سبب ذكري لهذا هو أنه عادةً ما تُقدَّم الطباعة الثلاثية الأبعاد لصناع السياسات والتربويين ودافعي الضرائب من العامة باعتبارها طريقة لتحسين تعلُّم الرياضيات والعلوم والتكنولوجيا والهندسة. يسير الحديث على النحو التالي: إذا كانت مناهج الرياضيات والهندسة والعلوم في المدارس الحكومية أكثر جاذبية، فسيختار المزيد من الطلاب دراسة الهندسة في الكلية، وربما في مرحلة الدراسات العليا كذلك. ستساعد الطابعات الثلاثية الأبعاد في اجتذاب الطلاب لدراسة مناهج الرياضيات والعلوم والتكنولوجيا والهندسة. وسيؤدي استخدام الطباعة الثلاثية الأبعاد في المدارس الحكومية إلى التحاق عدد أكبر من المهندسين المدرَّبين والتقنيين المهرة بقوة العمل، وستكون نتيجة

هذا زيادة في ريادة الأعمال والإبداع التقني، وسيُخلق المزيد من الإبداع وظائف وشركات تقنية جديدة.

ربما من الحقيقي أن الطابعات الثلاثية الأبعاد ستُلهم جيلًا جديدًا من الطلاب لتعلُّم الهندسة والرياضات والتكنولوجيا، وأتمنى هذا، لكن المشكلة في تبرير الاستثمار في التصميم والطباعة الثلاثية الأبعاد كأداة تدريس لتلك المواد هي أن هذه التقنيات التعليمية المثيرة عرضة لخطر أن تصبح محصورة في نطاق تعليمي محدود.

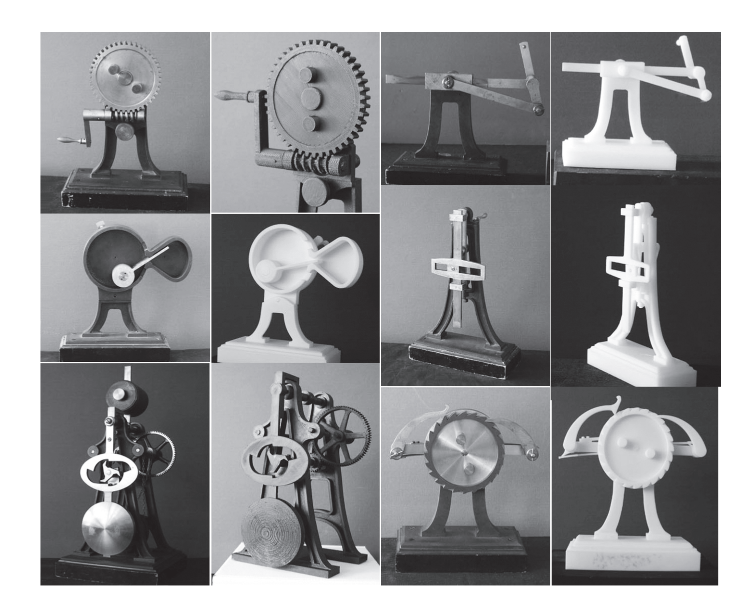
بدلًا من ذلك، يمكن لأدوات التصميم والتصنيع مثل الطابعات الثلاثية الأبعاد أن تُشعل الحماس لتعلُّم كل المواد والمجالات، ومنها العلوم الإنسانية والفنون، التي تعاني من قلة التمويل بنحو مزمن. منذ بضعة عقود، كانت أجهزة الكمبيوتر تُعتبر متعلقة فقط بموضوعات تدريس الرياضيات والعلوم والتكنولوجيا والهندسة. أما اليوم، فقد غيرت شكل الفن والكتابة والتاريخ ومجالات أخرى خارج العلوم والرياضيات.

هناك فائدة أخرى للتفكير بشأن التصميم والطباعة الثلاثية الأبعاد بنحو أوسع، وهي قيمتها كأداة تدريس لإيصال المعرفة للطلاب الذين لا يُبلون بلاءً حسنًا في ظل نظام التعليم السائد. لا يناسب أسلوب «عرض النظرية أولًا» في التعليم جميع الطلاب، ويعاني بعضهم من فهم بعض المفاهيم المجردة إذا لم يكونوا قد رأَوْا أو لمسوا الشيء الذي يدرسونه.

ربما يستفيد الطلاب ضعاف البصر من قدرتهم على الإمساك بنماذج مادية للمفاهيم المجردة الأساسية في أيديهم. بالإضافة إلى ذلك، وبالنسبة إلى جميع الطلاب — بغضِّ النظر عن قدرتهم على استيعاب المعارف الجديدة — فإن إعادة صنع الدروس من جديد على هيئة مادية تزيد من تعزيز ما يتعلَّموه، وربما الأكثر أهمية هو أن العديد من الطلاب سيستمتعون بالتعليم المباشر.

يقلل الكثير من الناس من أهمية حقيقة أن اليوم الدراسي بالنسبة إلى الكثير من الطلاب يُعتبر تدريبًا طويلًا ومريعًا. وبحسب ما يقول جلين بول: «يجب أن يكون التعلم ممتعًا.» ربما يبدو هذا ضحلًا، لكنك إذا كنت في الصف السابع، ما نوع الخُطط الدراسية التي يمكنها أن تجعلك تتطلع للقدوم إلى المدرسة كل يوم؟

دعونا نلقِ نظرة على الطباعة الثلاثية الأبعاد من منظور تربوي بَحْت؛ هل من المحتمل أن تؤديَ إتاحة أدوات التصميم والإنتاج للطلاب إلى تحسين أسلوب تعلُّمهم؟ ربما — وكما لاحظ المدرسون — يتحسن أداء الطلاب الذين لا يُبلون بلاءً حسنًا في ظل التدريس بالطرق التقليدية عندما تُتاح لهم أدواتهم الخاصة للتصميم والإنتاج.



متحف لآلات القرن التاسع عشر ونُسخ طبق الأصل منها قابلة للطباعة بنحو ثلاثي الأبعاد والتنزيل (الصورة مهداة من kmoddl.library.cornell.edu).

## (٢-١) نتائج الاختبارات في مقابل المهارة المكتسبة من الخبرة المباشرة

عندما تحدثت مع ديف وايت، قال لي ملاحظة سمعتها من العديد من مدرسي التصميم والهندسة؛ فعلى مدار السنوات، اكتشف ديف أن الطلاب البارعين بشدة في إنجاز فروضهم وتعلُّم دروسهم ليسوا دائمًا أفضل طلابه. قال ديف: «لا أفاجأ أبدًا عندما أرى طلابًا أقل حماسًا للكتاب الدراسي والفروض التحريرية يزيد حماسهم عندما يصلون لمرحلة التصميم من أي مشروع.»

لاحظ جلين بول كذلك الفجوة بين فهم نظرية بنحو كامل وتطبيقها الفعلي بإتقان، وعن هذا يقول: «رأيت طلابًا قرءوا للتوِّ عن الدوائر الكهربائية، يصنعونها بإتقان في بيئة محاكاة. على الرغم من ذلك، فإن نفس الطلاب عندما تُقدم لهم دوائر كهربائية حقيقية

يفشلون بنحو متكرر في صنعها. هناك أمرٌ ما يتعلق بالبعد المادي، وتجرِبة التعلُّم في هذا البعد، بالإضافة للبعد النظري، يغير أدمغتنا ويجعلنا لا ننسى ما نتعلمه.»

تدعم الأبحاث السابقة ما يقوله جلين عن أهمية التجارب المباشرة. في عام ١٩٩٥، قارن أحد الباحثين بين قدرة الطلاب على صنع دائرة كهربائية حقيقية وبين نتائج اختباراتهم التحريرية في نفس الموضوع. برهن الطلاب موضع الدراسة على معرفتهم العملية بالدوائر بتنفيذ مهام مباشرة؛ مثل صنع إحدى تلك الدوائر واختبارها، وخضع نفس الطلاب لاختبار سؤال وجواب حول كيفية عمل تلك الدوائر. أشارت نتائج الدراسة إلى أن الطلاب الذين حصلوا على نتائج جيدة في الاختبار لم يُظهروا مهارة عندما واجهوا الدوائر الملموسة. بمعنًى آخر، إن نتائج الاختبارات التحريرية ليست مؤشرًا يُعتمد عليه لتحديد قدرة الطالب على العمل مع دائرة حقيقية على أرض الواقع.[2]

يثير هذا البحث السؤال عن أيهما أكثر فاعلية: تعليم الطلاب معلومات جديدة بعرض النظرية عليهم أولًا ثم تطبيقها لاحقًا؟ أم أن التعلُّم يزدهر بنحو أكبر إذا جرب الطلاب أولًا المعرفة بنحو مباشر — بتنفيذها على أرض الواقع — ثم تعمقوا في الجانب النظري بعد ذلك؟ هذا السؤال له أهمية كبرى لمن يحاولون معرفة كيفية استخلاص قيمة تربوية بدمج برامج التصميم والطابعات الثلاثية الأبعاد في المناهج الدراسية.

الإجابة بوضوح، هي أن كل طالب يختلف عن الآخر؛ والطلاب المختلفون يُفضِّلون أشياءَ مختلفة، وحتى تفضيلات التعلم الفردي تختلف بِناء على المادة ذات الصلة وتعقيد المعرفة الجديدة.

## (٢-٢) ضرورة تجاهل أنماط التعلم

نأمل ألا يقع من يحاولون وضع مناهج دراسية تتضمن برامج التصميم والطباعة الثلاثية الأبعاد في فخ حصر هذه التقنيات في أنماط تعلُّم محددة بعينها. تحمل فكرة أنماط التعلم جاذبية ضخمة للمدرسين والآباء والطلاب والشركات التي تبيع المناهج التعليمية، لكن المشكلة تكمن في أن وجود أنماط التعلم لا يدعمه البحث العلمي.[3] في الواقع، فإن بعض الأبحاث تشير إلى أن الطلاب ينتبهون بنحو أكبر ويبذلون جهدًا أكبر، ويؤدون بنحو أفضل، في فصول يكون نمط التعلم فيها مختلفًا عن نمط تعلُّمهم المفضل.

تسللت فكرةُ أن لكل منا أسلوبًا أمثل في التعلم بنحوٍ ما إلى الفكر السائد عن الفصل الدراسي، وأصبحت الآن مكونًا راسخًا في استراتيجية التعليم. وبنحو يشبه الاعتقاد في أبراج

الطالع، فإن المدرسين والآباء وحتى الطلاب، ولبضعة عقود، تبنَّوْا فكرة أن لكل طالب أسلوبَه الفريد في التعلُّم؛ واستجابة لهذا، وعلى مدار العقود القليلة الماضية، فإن دارسي النظريات الدراسية والتعليمية حددوا وحصروا أكثر من سبعين نمطًا موثقًا للتعلُّم.[4]

إن خطر تصميم مناهج دراسية طبقًا لأنماط التعلُّم لا يتعلق كثيرًا بغياب الأدلة التجريبية. الخطر هو أن صنع المناهج بهذه الطريقة يتسم بالتشتيت والمحدودية؛ فمحاولة وضع منهج جديد ومثير للاهتمام عن التصميم طبقًا لأنماط تعلُّم خيالية يُضيع وقت المدير ويبدد موارد الفصول.

ربما يجب علينا توضيح كيف يعرف الباحثون أنماط التعلُّم؛ يشير هذا المصطلح إلى فكرة أن الأفراد يختلفون بعضهم عن بعض فيما يتعلق بأي أسلوب تعلُّم أو تدريس يُعد أكثر فاعلية بالنسبة إليهم. يدعي من يُفضِّلون التقييم القائم على أنماط التعلم أن أفضل طريقة لتعلُّم أي شخص هي تحديد أسلوبه الفردي في التعلم أولًا: ثم وضع الخطط الدراسية طبقًا لهذا، وهي عملية تعرف باسم «التشبيك».[5]

تطلب أساليب التقييم التقليدية لأنماط التعلُّم من الناس تحديد أي طريقة من طرق تقديم المعلومات التي يُفضِّلونها (على سبيل المثال، الكلمات مقابل الصور مقابل الإلقاء). سؤال آخر شائع؛ هو أي نوع من النشاط العقلي يجده الشخص مثيرًا أو ملائمًا (على سبيل المثال، التحليل مقابل الاستماع). من المثير افتراض أن التصميم والطباعة الثلاثية الأبعاد سينالان إعجاب الطلاب الذين يُعتبر مناسبًا لهم نمط تعلُّم «مرئي» أو «لمسي». المشكلة هي أن هذا سيستبعد الطلاب الأَكْفَاء الذين إذا خضعوا للاختبار، سيقعون في تصنيف آخر.

إذا كانت أنماط التعلم علمًا مشكوكًا فيه، فهل هناك أي أساس نظري للتأكيد على قيمة الطباعة الثلاثية الأبعاد وأدوات التصميم في فصول التعليم الأساسي؟ ربما. من يمتلكون فهمًا راسخًا لمعلومةٍ ما أو مفهوم مجرد معين يمكنهم إعادة إنتاج المعلومة أو المفهوم عبر وسط جديد؛ فالطريقة الأكثر علمية لوصف نفس المعرفة عبر وسائط مختلفة، وهي أن تُقدَّم بـ «تصورات متعددة».[6]

فيما يلي مثال على هذا؛ ما الذي يرد لخاطرك عندما تفكر في كلمة «قَطع مكافئ»؟ إذا كنت تفهم فعلًا مفهوم القَطع المكافئ، فإنك ستفكر فورًا في معادلة متعددة الحدود أو ربما منحنًى هندسي أو مرآة تركيزية، وربما حتى سطح سائل دوار. هذه التصورات كلها — سواء تحليلية أو هندسية أو بصرية أو فيزيائية — ترتبط بكلمة قَطع مكافئ،

وأي شخص يمتلك فهمًا حقيقيًّا لهذه المفاهيم سيرى الرابطة بينها جميعًا. لكن إذا فكرت في واحدة فقط من هذه التصورات، فربما تكون لم تتقن بعد المفهوم بنحو كامل.

أحد أقوى الجوانب لتحويل التصميم الرقمي لجسم مادي ملموس هو تعزيز المعرفة المجردة عبر وسائط متعددة. المعرفة التي يحتويها ملف التصميم هي معرفة افتراضية محفوظة بوسط رقمي، وتصبح مادية بعد طباعتها. تبرز أدوات التصميم والطباعة الثلاثية الأبعاد كأدوات تُمثِّل تحديًا للطلاب لتصوير مفهوم أو عملية من خلال وسط جديد.

## (٣) الآن، دعنا نَرَكَ ترسم هذه المعادلة المجردة على هيئة شكل بياني

يدرك الناس قيمة استخدام الوسائط المرئية لتوضيح أي موضوع مجرد ومعقد. العديد منا يتقبلون بنفس القدر فكرة أن أفضل طريقة لتعزيز المعرفة الجديدة المكتسبة من كتاب هي تطبيقها لحل مشكلة عملية واقعية، وأحد الأسباب التي تجعل الطباعة الثلاثية الأبعاد أداة تعليم قيمة هي أنها تمنح تعلُّمَ وتدريس المفاهيم المجردة بُعدًا ماديًّا إضافيًّا.

على سبيل المثال، في خُطة درس «التعلم بالصنع» الخاصة ببرنامج فاب آت سكول، عُرِّفَت الطاقة الحركية بأنها «الطاقة التي يكتسبها نظام أو جسم نتيجة تحركه، والتي تزيد بزيادة سرعته أو حجمه.» هذا الوصف المكتوب يُعتبر إحدى الطرق لتقديم هذا المفهوم. أتيح وسط إضافي لتعزيز هذا المفهوم عندما صمم الطلاب وصنعوا توربين رياح، ووضعوه أمام مِروحة لتشغيل دائرة إلكترونية.

عندما قاد ديف وايت الطلاب في فصل الجيولوجيا خلال عملية الطباعة الثلاثية الأبعاد، استخدموا وسائط متعددة ومختلفة. أولًا: درس الطلاب البيانات التي تصور رقميًّا شكل سطح الجبل (البيانات هي أحد الوسائط التي تصف شكل البركان). إحدى مجموعات البيانات صورت شكل البركان قبل ثورته، وصورته مرة أخرى بعد ثورته. تلا ذلك تحويل الطلاب للبيانات الطوبوغرافية الأولية إلى ملف تصميم عامل (الهيئة الرقمية هي وسط آخر). وأخيرًا، طبع الطلاب نسخًا مصغرة طبق الأصل من بركان جبل سانت هيلينز بعد ثورته (الوسط المادي).

إنني أتساءل — رغم أننا ربما لن نعرف أبدًا الإجابة على هذا الآن — إن كان الطلاب سيتذكرون بعد عشر سنوات من الآن هذا التدريب الجيولوجي. وما الذي سيتذكرونه عن

الموضوع؟ إذا كان بعض الطلاب قرءوا فقط عن البركان الثائر بينما استمر البعض الآخر في تطبيق التدريب لآخره، فإنني أتساءل أي مجموعة ستتذكر الدرس بنحو أفضل.

إليكم تجرِبة مثيرة لاختبار قوة التصورات المتعددة. أولًا: اكتب معادلة بسيطة مثل: ص = ١/س. تُعتبر المعادلات الرياضية المكتوبة إحدى الطرق لتصوير العلاقة بين الأرقام. هناك وسط ثانٍ، وهو وسط مرئي، وهو رسم المعادلة على شكل بياني ثنائي البعد.

دعونا نتصور الآن أنك ستأخذ تلك المعادلة المكتوبة البسيطة لمركز التسوق أو المجلس التشريعي في ولايتك، وستطلب من عدة أفراد ناضجين أن يوجِدوا قيمة «س» في المعادلة. ربما يدرك الكثيرون كيفية عمل المعادلة، ويعرفون أنه لكي يوجدون قيمة «س»، يجب أن تُعطى قيمة «ص» (أو العكس). في هذه الحالة إذا كنتَ ستخبرهم بأن قيمة «ص» تساوي ٢ فيمكن بكل سهولة حساب قيمة «س» التي ستكون ١ / ٢.

ماذا لو كانت نفس المعادلة المكتوبة معبرًا عنها عبر وسط جديد؟ دعنا نفترض أنك طلبت من الشخص الذي حل المعادلة المكتوبة بنحو صحيح التعبير عن شكلها برسمها على هيئة رسم بياني. إذا رجعت للمركز التِّجاري أو المجلس التشريعي، وطلبت من عينة عشوائية من الناس القيام بهذا، فمن المحتمل أن عددًا قليلًا للغاية من الناس سيكونون مستعدين لتصوير المعادلة باستخدام رسم بياني. معظمنا لا يحتفظ بالمهارات الرياضية التي تعلَّمها في المدرسة الثانوية أو الكلية، وهذا أحد الأسباب أنه بين المتقدمين لبرامج الحصول على ماجستير إدارة الأعمال، فإن الحد المسموح به لنتائج اختبار الرياضيات لتقييم الخريجين لكبار المديرين التنفيذيين أقل بكثير من الحد المسموح به للمتقدمين الذين تخرَّجوا للتوِّ من الجامعة.

يرى بعض المنظِّرين التربويين أن سبب نسيان معظم الناس لدروس الرياضيات سريعًا بعد تركهم للمدرسة هو تعلُّم الرياضيات بوسط مجرد واحد فقط؛ فإذا تعلَّم الطلاب مفاهيم الرياضيات المجردة ثم حولوها لوسائط مختلفة، فربما يكتسبون إتقانًا أكبر لها، ويتذكرونها بنحو أفضل؛ فتحويل مفهوم مجرد لوسائط مختلفة يتطلب مهارة وإتقانًا. ومن واقع تجرِبتي، فإن حفظ المفاهيم المجردة ساعدني في اجتياز الامتحانات، لكنني سُرعانَ ما نسِيت معظم ما حفظته بعد انتهاء الامتحانات.

من السهل تدريس وتعلُّم المفاهيم في وسط واحد. سيساعدك بالطبع أسلوب الحفظ والاستظهار على إتقان هذه المفاهيم، لكن الإتقان الحقيقي الكامل لا يحدث بالضرورة

باستخدام هذه الطريقة فقط. المشكلة هي أن معظم التدريس الذي يحدث في الفصول الدراسية يتركز على صفحات الكتب الدراسية، لكن هذا ليس بالضرورة ما يتذكره معظم الناس.

ربما يتذكر الطلاب الذين شاركوا في مشروع برنامج فاب آت سكول لاحقًا التعريف المكتوب للطاقة الحركية. في الواقع، فإن هذه القلة المحظوظة، والتي تتذكر جيدًا التعريف، ستتمكن بعد عدة سنوات من سرده بدقة. على الرغم من ذلك، فإنه من المرجح أكثر أن معظم الطلاب سيتذكرون تعريف الطاقة الحركية على أنها ما جعل رِيَش توربين الرياح الخاص بهم تُشغِّل الدائرة الإلكترونية.

## (٣-١) التعلُّم باللمس والأجسام المادية القابلة للتحوير

يمكن التعبير عن المعادلات الرياضية بخط بسيط ثنائي الأبعاد، ويمكن التعبير عن المعادلات الأكثر تعقيدًا بأجسام ثلاثية الأبعاد. وإذا كان نقل نفس النموذج من المعادلة المكتوبة لرسم بياني مسطح يُعتبر تحديًا، فتخيل التحدي المتمثل في تعليم طالب التأثير المتبادل بين الضغط والحجم ودرجة الحرارة (معادلات الديناميكا الحرارية).

يسمي المدرسون الوسائل التعليمية الثلاثية الأبعاد «الأجسام القابلة للتحوير»، وتدعم هذه الأجسام المادية التعليمية ما يُعرف باسم «التعلُّم باللمس» وهو ليس نمط تعلم، بل هو قناة أساسية للتعلم.

في التعلم باللمس، بدلًا من رؤية صورة لشكل بياني على سبورة أو شاشة كمبيوتر، يُمسِك الطلاب بنموذج ثلاثي الأبعاد لمفهوم أساسي في يدهم؛ واعتمادًا على حاسة اللمس، يستطيعون استيعاب ومعالجة المعلومة. بالنسبة إلى الطلاب ضعاف البصر، فإن التعلم باللمس يُعتبر قناة مهمة للحصول على المعلومات، وإذا استطاع الطلاب التقاط تفاصيل مفهومٍ ما وتحويلها إلى ملف تصميم وطباعة جسم مادي قابل للتحوير، فإن الانتقال من وسيطٍ لآخر ربما يساعد في تعزيز معرفة الطلاب الجديدة المجردة.

منذ بضع سنوات، تلقيت رسالة إلكترونية من كرايتن دبيو الأستاذ بقسم الفيزياء بجامعة واشنطن. كان كرايتن يُدرِّس الديناميكا الحرارية، وهي دراسة التفاعل بين آثار الضغط والحجم ودرجة الحرارة في الأنظمة المغلقة. على سبيل المثال، إذا استخدمت مِنْفاخ دراجة، فستلاحظ أنك كلما ضغطت على المِقْبض، فإنك تسخِّن المِنْفاخ، وعندما تضغط

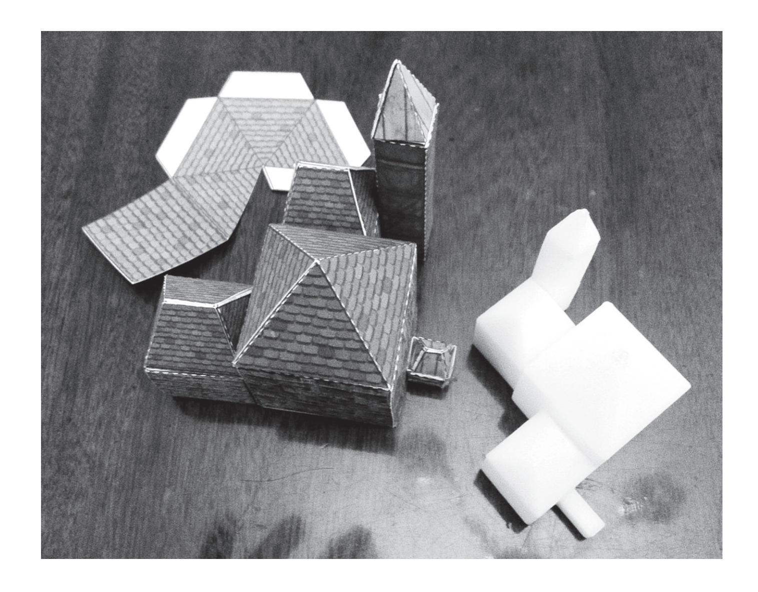
الهواء، فأنت تَزيد ضغطه وتقلل من حجمه؛ ومن ثَم تزيد حرارته، فهناك تفاعل ثلاثي ديناميكي مستمر قائم بين الضغط والحجم ودرجة الحرارة.

بينما كان يمكن لمعظم الطلاب مشاهدة الرسومات البيانية للعلاقة بين الضغط والحرارة والحجم التي كان يعرضها دبيو في محاضراته، طالب واحد فقط وهو ديف بلاسمان، كان يعاني من ضعف شديد في البصر، وكان يواجه مشكلة في تصور علاقات تلك الرسومات المكانية المعقدة. منذ ثلاثين عامًا، ولمساعدة بلاسمان في استيعاب المبادئ الأساسية للديناميكا الحرارية رغم ضعف بصره، صنع دبيو نموذجًا يدويًّا من الصَّلصال لتصوير العلاقات التي كان الطلاب الآخرون قادرين على رؤيتها على السبورة. كان ارتفاع النموذج أربع بوصات تقريبًا، وعرض قاعدته ست بوصات. كان ديف يستطيع تمرير أصبعه في اتجاه الضغط المتزايد، و«الشعور» كيف أن السطح، في كل نقطة، يميل لأسفل في اتجاه الحجم؛ مما يعني أنه عندما يزيد الضغط، يقل الحجم.

بعد التخرج بثلاثين عامًا، تذكَّر ديف نموذج الصَّلصال، وأرسل رسالة إلكترونية لدبيو يسأله فيها إذا كان النموذج موجودًا. ولحسن الحظ، استطاع النموذج مقاومة اختبار الزمن. وبما أن دبيو كان في طريقه للتقاعد من جامعة واشنطن، وبعد إخلائه لمكتبه، شحن نموذج ديف الذي كان يعرض لمفاهيم الديناميكا الحرارية لمعملي. أردت أنا وديف رؤية هل كان يمكننا مسح النموذج الأصلي المصنوع يدويًّا ضوئيًّا، وتحويل بيانات المسح إلى ملف تصميم يمكن لمدرسي الفيزياء الآخرين استخدامه.

وصل النموذج الصَّلصالي في البريد لكنه كان محطمًا لقطع صغيرة، وبعد إعادة تجميعه بحرص، مسحناه ضوئيًّا بنجاح، وحولنا بيانات المسح لملف تصميم، وأتحناه مجانًا عبر الإنترنت. اليوم، يمكن لأي شخص متاح له استخدام طابعة ثلاثية الأبعاد إعادة صنع نسخة طبق الأصل من نموذج الدكتور دبيو الصَّلصالي اليدوي الشارح لمفاهيم الديناميكا الحرارية الذي كان يومًا ما الوحيد من نوعه. لا أعرف إذا كان أي شخص استخدم هذا النموذج، وإذا كان أي طالب آخر ضعيف البصر استفاد منه أم لا، لكن الفرصة متاحة لأي شخص يرغب في الاستفادة منه.

في قسم الفيزياء الذي اعتاد أبي العمل به، أتذكَّر مشاهدة الرَّدْهات وهي مغطاة بنماذج تعليمية قديمة مغطاة بالغبار، من الكريستالات والبندولات والزنبركات والسقاطات. كانت هذه النماذج جميلة، ومن الواضح أنها كانت من صنع شخص يحب ويهتم بالتعليم، لكن هذا الاهتمام وتلك الموهبة لم يكونا كافيَيْن لجعل الآخرين يستخدمون النماذج؛ إذ بمجرد تقاعد صانع النموذج، فإن النموذج نفسه يخرج من نطاق الاستعمال.



أجسام مادية قابلة للتحوير: أجسام تعليمية قابلة للتحوير ثلاثية الأبعاد مصنوعة من الورق المقوَّى المطوي ثم طُبعت بنحو ثلاثي الأبعاد (الصورة مهداة من جلين بول من جامعة فرجينيا).

لكن ربما تبث الطباعة الثلاثية الأبعاد الحياة من جديد في هذه النماذج القديمة؛ إذ تسهل الطابعات الثلاثية الأبعاد مشاركة ونشر النماذج المادية، وتزيد حافز صنعها في المقام الأول.

تفتح الطباعة الثلاثية الأبعاد البابَ لعدد ضخم من الاحتمالات الممكنة لصنع أجسام تعليمية قابلة للتحوير، وتتيح الأجسامُ التعليمية القابلة للتحوير المطبوعة بنحو ثلاثي الأبعاد وذات التصميم المخصص للمعلمين، القدرةَ على صنع أدوات تدريس متفردة لا تحتويها أي عُدة أدوات تقليدية للتدريس. ويمكن للمعلمين مشاركة وتطوير الأجسام القابلة للتحوير، المطبوعة بنحو ثلاثي الأبعاد الخاصة بعضها ببعض، وتعديلها لتناسب الخطط الدراسية خاصتهم.

في المدارس الابتدائية، يمكن لهذه الأجسام شرح مفاهيم بسيطة للطلاب، كما يمكن للطلاب صنع نموذج ثلاثي الأبعاد لحشرة نادرة أو نسخ من أجسام أثرية دقيقة.




النموذج الأصلي الصلصالي لمبادئ الديناميكا الحرارية (على اليسار) ونسخة طبق الأصل منه مطبوعة بنحو ثلاثي الأبعاد.

في الفصول الأعلى مستوًى، يمكن أن تساعد الأجسام القابلة للتحوير الطلاب في فهم مفاهيم أكثر تعقيدًا؛ مثل نماذج الجزيئات أو أجزاء العُدد الميكانيكية.

## (٤) عوائق استخدام الطباعة الثلاثية الأبعاد في الفصول

اليوم، انتشرت الطابعات الثلاثية الأبعاد على نحو كبير في المدارس الثانوية، وإذا كان هناك بالفعل برامج تصميم ثلاثية الأبعاد أو آلة حفر وتقطيع بالكمبيوتر في إحدى المدارس الثانوية، فليس من الصعب تركيب طابعة ثلاثية الأبعاد استهلاكية رخيصة الثمن. بنحوٍ ما، عندما تدخل الطابعة الثلاثية الأبعاد الفصل المدرسي في أعقاب برنامج تصميم ثلاثي الأبعاد، فهي موجودة حيث يجب أن تكون: أداة تصنيع في الفصل يمكنها تحويل أفكار التصميم إلى واقع ملموس.

إن العقبات الأساسية لدخول الطباعة الثلاثية الأبعاد في مدارس المرحلتين الابتدائية والمتوسطة هي تدريب المعلمين والمنهج الدراسي المناسب، وتضمين الطباعة والتصميم

ثلاثيي الأبعاد في عملية الاختبار القياسية. ويحتاج المدرسون لأن يكونوا متحمسين ومرتاحين لدمج برامج التصميم والطباعة الثلاثية الأبعاد في المناهج الأساسية للعلوم والرياضيات. ويحتاج الآباء ومجالس إدارة المدارس لفهم دورهما في العملية التعليمية، وبطريقةٍ ما نحتاج إلى صنع منهج يستفيد من إمكاناتهما.

يبث المدرسون الحياة في فصولهم، وهم من يحدد أي نوع من نشاطات التعلم سيشارك فيها طلابهم خلال العام الدراسي. لكن العديد من مدرسي المدارس الابتدائية لا يرتاحون إجمالًا لتدريس العلوم والرياضيات؛ فهم يعتبرون أنفسهم بالأساس مدرسي قراءة.[7]

بنحوٍ ما، ولإعداد المعلمين للاعتياد على المناهج القائمة على الطباعة الثلاثية الأبعاد، نحتاج إلى التأكد من أن تلك المناهج لا تُعرِّف المدرسين فقط بالجوانب الميكانيكية الأساسية للتصميم وعملية الطباعة الثلاثية الأبعاد؛ فالجميع لا يتحمسون للتقنيات الجديدة لمجرد أنها جديدة، فالعديد من الطلاب والمدرسين يتحمسون فقط عندما يرَوْن أنهم يستطيعون استخدام تقنيات التصميم والطباعة الثلاثية الأبعاد في مجالهم الإبداعي، أو لحل مشكلات في حياتهم اليومية.

إذا استثمرت المدارس الحكومية في الطابعات الثلاثية الأبعاد والمناهج القائمة عليها، فتحتاج لتبرير هذا الاستثمار إلى أن تتماشى خُطط الدروس مع معايير التعليم الوطنية والخاصة بالولايات ليلتزم المدرسون بتدريس هذه النشاطات. في الثمانينيات من القرن الماضي، مرَّر معظم الولايات في الولايات المتحدة سياسات تهدف لتحسين جودة التعليم الأساسي بتطبيق إرشادات وأُطر للمناهج في جميع أنحائها؛ فتُلزم حوالي نصف الولايات الطلاب أن يجتازوا شكلًا ما من امتحانات التخرج قبل ترك المدارس الثانوية.

تتمتع المدارس الخاصة بالمزيد من الحرية؛ حيث إنها لا تحتاج إلى الالتزام بالمعايير الخاصة بالولايات. في النظام الحكومي، فإن أداء المدرسين والمدارس على حد سواء يعتمد على أداء الطلاب بِناءً على الاختبارات السنوية الموحدة. وتُعتبر هذه الاختبارات سلاحًا ذا حدين؛ فمن جانب يمكن تحديد المدارس ذات الأداء المنخفض، وربما تحصل على المزيد من المساعدة والتمويل.

على الجانب الآخر، وللمفارقة، فإن نفس البرامج القياسية التي تهدف لتحسين جودة التعليم الأساسي الحكومي ربما تُمثِّل أيضًا عوائق لتبنِّي مناهج تعتمد على التصميم والطباعة الثلاثية الأبعاد. وبسبب التأكيد على أداء الطلاب في الامتحانات بسبب قانون

«عدم استثناء أي طفل»، أصبح تقديم المدارس لمحتوًى جديد في منهج مزدحم بالفعل مخاطرة.

بالإضافة إلى ذلك، في معظم مدارس التعليم الأساسي، فإن الهندسة والتصميم ليسا متطلبًا تعليميًّا أساسيًّا؛ ولهذا ليسا جزءًا من الامتحانات القياسية. ولتبنِّي تقنيات التصميم والطباعة، يجب على المدرسين معرفة كيفية تطبيقها لدعم المعايير الخاصة بالولايات، ويكمن التحدي في تحويل المعايير المفاهيمية الغامضة إلى خطط دراسية مثيرة وواضحة ومناسبة.

بعض الولايات تضع مناهج وتعتمد كتبًا مدرسية لاستخدامها في كافة أنحائها، لكن عادةً ما يكون تطوير واستخدام المواد المنهجية مسئولية المدرسة أو المنطقة التعليمية المحلية. الجيد في الأمر فيما يتعلق بالمعايير الخاصة بالولايات هو أن المعايير تميل إلى أن تكون مبهمة؛ مما يتيح للمدرسين الكثير من المساحة لتدريس ما يرَوْن أنه الأفضل.

هناك القليل من الأبحاث الرسمية المسبقة حول أفضل طريقة لدمج الطباعة الثلاثية الأبعاد ونظم التصنيع المكتبية الأخرى في التدريس في الفصول. لا يُعتبر تدريس واختبار منهج جديد إجراءً بسيطًا؛ إذ تطلب وزارة التعليم الأمريكية من مدرسي المدارس الحكومية المشاركة فيما يعرف باسم «تصميم المناهج القائم على الأدلة».

واستلهامًا مما تفعله إدارة الدواء والغذاء لتقييم فاعلية الأدوية الجديدة، فإن طرق التدريس أو المناهج الجديدة يجب أن تكون مدعومة ببيانات مكتسَبة من تجارِب دراسية عشوائية مضبوطة. لا يمكن للمدرسين والباحثين استخدام طريقة تدريس جديدة بِناء على حدس لهم فقط؛ إذ تحتاج التجارِب في البداية لمقارنة أداء الطلاب الخاضعين لطريقة التدريس الجديدة المقترحة بأداء الطلاب الخاضعين لطريقة التدريس القياسية الحالية (القيمة القاعدية). ولاعتماد الطريقة الجديدة، يجب عليها إحداث تطور ملحوظ من الناحية الإحصائية في الأداء على المدَيَيْن القصير والطويل.

يكمن التحدي في «تصميم المناهج القائم على الأدلة» في أنه من الصعب إجراء تجارِب مُعَمَّاة عشوائية غير متحيزة في الفصل؛ فالأمر يستغرق وقتًا، وغالبًا ما يعي جميع المشاركين فيه — سواء كانوا المدرسين أو الطلبة أو آباءهم — أي مجموعة من الطلاب تخضع للتجارِب. وإذا كان المشاركون يمتلكون أفكارًا سلبية مسبقة حول طريقة ما، فإنه من المحتمل أن يتأثر سلوكهم، ولن يتبنَّوْا طواعيةً الطريقةَ التي يرفضونها بالفعل. ربما تُجري بعض المدارس بالفعل تجارِب لاختبار تأثير التصميم والطباعة الثلاثية الأبعاد على تعلُّم الطلاب، لكنها ستكون عملية بطيئة.



تمول شركة ميكربوت مدرسي مدارس التعليم الأساسي الحكومية لصنع خُطط دراسية مبتكَرة للفصول. في أحد فصول الصف الثاني في بروكلين بنيويورك، تعرَّف الطلاب على مفهوم التآكل بتصميم بيوت ووضعها على «ضفة نهر» رملية حيث انجرفت (الصورة مهداة من ريان كين).

## (٥) المستقبل

هل ستغير الطباعة الثلاثية الأبعاد الفصل المدرسي؟ نعم. هل سيكون هناك تغير مفاجئ وهائل في المناهج الدراسية؟ لا؛ فمثل أي تقنية جديدة، ستُدخل الطباعة الثلاثية الأبعاد في الفصول ما بين موافق ورافض؛ حيث ستتبناها بعض المدارس والمواد الدراسية بينما سيرفضها آخرون.

يكمن المسار الأكثر صعوبة في مدارس المرحلتين الابتدائية والوسطى؛ فمعظم هذه المدارس لا تمتلك مناهجَ لتدريس التصميم والهندسة، ولدمج التصميم والطباعة الثلاثية الأبعاد في الفصول الحكومية التقليدية، يجب على المدرسين بنحوٍ ما استخدام هذه التقنيات لدعم اكتساب الطلاب للمعرفة الأساسية التقليدية. وكنتيجةٍ لهذا، فإن تقديم الطباعة الثلاثية الأبعاد يصبح عبئًا يختبر براعة المعلم.

يجب هنا أن نذكر أن بعض أكثر الاستخدامات جرأة وابتكارًا للطباعة الثلاثية الأبعاد تحدث في مناهج الجامعات والكليات، لكن من الأسهل لأساتذة الجامعات تجرِبة الطباعة الثلاثية الأبعاد في قاعات محاضراتهم، كما يتسم تخطيط الدروس في فصول التعليم الأساسي بمرونةٍ أقل، ولا يمتلك معلمو المدارس الحكومية التمويل الجاهز والمتاح للحصول على هذه التقنيات.

سيكون من سوء الحظ أن تسلك أدوات التصميم والطباعة الثلاثية الأبعاد نفس الطريق الذي بدأتْه أجهزة الكمبيوتر بالفعل. تمتلك مدارس التعليم الأساسي والجامعات الموسرة اتصالًا سريعًا بالإنترنت، ومدرسين يعرفون الكثير عن التكنولوجيا. على العكس، فإن مدارس المناطق التعليمية التي تعاني من شح الموارد تعمل بمعمل كمبيوتر وحيد، أجهزته قديمة (وعادةً ما يكون مغلقًا)، ويذهب إليه الطلاب في زيارات مرتبة سلفًا. ومن المعروف أن الطلاب يلتحقون بنظام التعليم الأساسي الحكومي أكثر من أي مسار تعليمي أخرى، ونحن نؤمن بأن الطباعة الثلاثية الأبعاد تمتلك ما يمكن أن تقدمه للطلاب ذوي القدرات الاستيعابية والخلفيات الاجتماعية الاقتصادية المختلفة.

بالنظر إلى الطرق التي أثرت بها أجهزة الكمبيوتر في التعليم، فإنه من السهل إيجاد طرق تأثير مشابهة فيما يتعلق بالطابعات الثلاثية الأبعاد. كان الكمبيوتر في البداية يُستخدم لتعزيز تعلُّم المواد الدراسية التي كانت تُعتبر «مرتبطة بالكمبيوتر» مثل البرمجة أو ربما الرياضيات، لكن هذا تغير، وأصبحت أجهزة الكمبيوتر اليوم تُستخدم في تدريس كل المواد؛ بدءًا من التاريخ حتى الرسم. الأهم من ذلك هو أنها فتحت الباب لطرق جديدة تمامًا من التدريس وتعلُّم هذه المواد، والاحتمالات المتاحة في هذا الشأن لا نهاية لها.

من المحتمل أن تسلك الطابعات الثلاثية الأبعاد نفس الطريق. في البداية، استُخدمت الطابعات الثلاثية الأبعاد في تدريس المواد التي اعتُبرت وثيقة الصلة بها مثل مادة مهارات التكنولوجيا، وقريبًا ستُستخدم في تدريس مواد أخرى، بدءًا من الرياضيات والأحياء وانتهاءً بالرسم والتاريخ والأدب. ومثل أجهزة الكمبيوتر، فإنها ستفتح الطريق لسبل جديدة تمامًا للتدريس والتعلُّم لا يمكننا تخيُّلها اليوم.

الفصل العاشر

# آفاق جديدة في التصميم والهندسة المعمارية والفن

يصمم جاري بعض الأدوات المنزلية. عندما أذهب لتناول العشاء لديه في منزله، يُريني بتفاخرٍ آخر إبداعاته الأكثر مبيعًا. في إحدى الأمسيات، عرض عليَّ أباجورة ذات تصميم مموج. مرة أخرى، عرض عليَّ رشاشَيْ فُلفُل ومِلْح متشابكَيْن في قطعة واحدة. بغضِّ النظر عن الشيء الذي كان يصممه، فبمجرد أن يبدأ عرضه المسائي، كنت أدرك بالفعل أين سينتهي الحديث.

كان جاري يحب أن يخبر ضيوفه للعشاء أن مرحلة التصميم هي الجزء الممتع، لكنها مجرد البداية. أما التحدي الحقيقي — وكما يقول، وهو ما يفرق بين المحترفين والهواة — فهو تحويل التصميم إلى شيء مُصنَّع. إن القفز من تصميم النموذج الأوليِّ لمنتج يُنتَج بأعداد كبيرة كان مُساويًا للقفز فوق صَدْعٍ آخذٍ في الاتساع.

كان جاري يوضح أن المصمم الجيد يجب عليه التأكد من أن فكرة التصميم يمكن صنعها فعليًّا باستخدام آلة المصنع، ويجب على المصمم أيضًا أن يكون مروِّجًا ماهرًا ليقنع مُصنِّعًا بأن تصميمه يمكنه أن يدرَّ الأرباح الكافية لتعويض استثمار المُصنِّع الضخم في إقامة خط إنتاج.

لم أرَ جاري هذا منذ فترة؛ لكنني لا أُطيق الانتظار لأخبره بأن الأيام العصيبة التي كان يشهدها قد ولَّت؛ فالطابعات الثلاثية الأبعاد هي أجهزة الإنتاج التي كان الفنانون والمصممون في انتظارها. ربما تكون الأشكال المعقدة والفريدة أمرًا مقلقًا لمهندسي التصنيع، لكن بالنسبة إلى الفنانين ومصممي الأزياء وصانعي المجوهرات والمهندسين

المعماريين، فإن الأشكال المعقدة والأشكال الهندسية الجديدة تمثلان فرصًا جديدة غير مستكشفة.

يغترف المهندسون المعماريون والمصممون الصناعيون والفنانون بسرعة ولهفة، من الاحتياطي الضخم الجديد من احتمالات التصميم؛ فالطباعة الثلاثية الأبعاد تُزيل الحواجز الخاصة بالموارد والمهارات التي منعت العديد من المصممين الموهوبين من تحقيق أفكارهم على أرض الواقع، وتصنع تقنيات التصميم والطباعة الثلاثية الأبعاد أولى نجاحات تِجارية لها في المجالات التي تتطلب صنع المنتجات بأعداد صغيرة؛ مثل تصنيع المجوهرات وجوانب الديكور المنزلي الحديثة والباهظة الثمن وتصميم الأزياء التجريبي.

## (١) أجهزة الكمبيوتر التي تتصرف مثل الطبيعة

العديد من الأجسام الموجودة في الطبيعة لها أبعاد منتظمة تضاهي المعادلات الرياضية عندما تُقاس. هل رأيت صَدَفة المحار مقسومة لنصفين؟ الفراغ الحلزوني المكوِّن للصَّدَفة يُعتبر تعبيرًا فيزيائيًّا عن مفهوم رياضي قديم يسمَّى «متتالية فيبوناتشي». دائمًا ما تمتلك منحنيات الفراغ الحلزوني الداخلي نفس الشكل، سواء كانت الصَّدفة في حجم كرة تنس الطاولة أو بِطِّيخة كبيرة.

توجد متتالية فيبوناتشي في كل مكان في الطبيعة. تتشابك أغصان الشجر طبقًا لهذه المتتالية، وكذلك تتشكل أزهار الخرشوف ونباتات السَّرخس، وحتى أنماط التفاف ودوران طحالب الكِلْب.

تسير متتالية فيبوناتشي في نظام ممنهَج؛ حيث يُعتبر كلُّ عددٍ مجموعَ العددين السابقين عليه؛ ولذا تسير المتتالية كما يلي: ١، ١، ٢، ٣، ٥، ٨، ١٣، ٢١ وهلُمَّ جرًّا. ويمكن لأي قاعدة بسيطة إنتاج هذه المتتالية التي تتكشف تدريجيًّا. وطبقًا لهذه القاعدة، يمكن للكمبيوتر حساب سلسلة طويلة من أعداد متتاليات فيبوناتشي بكل سهولة.

وبازدياد قدرات أجهزة الكمبيوتر، فإن الباحثين يرَوْن أن إحدى أكثر الطرق فاعلية في تقليد ذكاء التصميم الطبيعي هي تطبيق القواعد الرياضية أو الخوارزميات لإنتاج الشكل. إن الصور الفنية الكسرية الثلاثية الأبعاد والمصنوعة بالكمبيوتر موجودة منذ عقود، لكنها ظلت حبيسة العالم الافتراضي حتى وقتٍ قريب. ما تغيَّر هو أن الطباعة الثلاثية الأبعاد جعلت من الممكن نقل النماذج المجرَّدة المعقَّدة من عالم الكمبيوتر إلى

أرض الواقع. وقبل ظهور الطباعة الثلاثية الأبعاد، كانت الغرف الداخلية للفراغ الحلزوني الداخلي لصَدف المحار مستحيلة الصنع بأي وسيلة أخرى سوى الطبيعة.

يستخدم المصممون برامج التصميم التقليدية منذ فترة طويلة، ويُعتبر التصميم الحيوي نموذجًا جديدًا آخذًا في الازدهار حاليًّا؛ حيث وُجدت أخيرًا أجهزة إخراج يمكنها إطلاق هذه المفاهيم والتصميمات للعالم المادي. وتتفتح عوالم جديدة من احتمالات التصميم بسبب تحرير الطابعات الثلاثية الأبعاد للنماذج الرياضية وقوانين الطبيعة من قيودها المجردة.

تُنتِج الخوارزميات، أو المعادلات، أنماطًا بتنوعات عديدة بتنوع البشر. وباستخدام مزيج من البيانات والخوارزميات، يمكن للمصممين صنع تنوع كبير من الأشكال والأنماط ثنائية وثلاثية الأبعاد. وبعض الخوارزميات يُنتج تركيبات متشعبة، وبعضها يُنتج أشكالًا منحنية مثل مجموعة من فقاقيع الصابون، والبعض الآخر يُنتج أشكالًا ذات نتوءات عشوائية ذات زوايا مثل بِلَّورات الكوارتز.

تُعتبر عملية التصنيع الطبيعية عملية تَكرارية؛ فكل كائن حي، من النبتة البسيطة حتى الجنين البشري، يتبع مجموعة صغيرة نسبيًّا من «قواعد» التطور التي تُطبق بنحو متكرر، بدءًا ببَذرة أو خلية جرثومية بسيطة. ومثل صيغة رياضية مكررة تُطبق على البيانات، فإن البَذرة تتطور في عدة أشكال وهيئات وأنماط، مدفوعة بإشارات من بيئتها أو مواردها المحدودة المتاحة. وعلى مستوًى أصغر، فإن أي لوح من بِلَّورات الثلج على الزجاج الأمامي للسيارة ينمو ويمتد، طبقًا لنمط متكرر منتظم، يبدأ بنواة تبلور.

يمكن لطاولات القهوة أن تنموَ كذلك. تُعتبر طاولة «فراكتال تي» طاولة قهوة مطبوعة بنحو ثلاثي الأبعاد، وهي من إنتاج المصممين جيرنوت أوبرفيل وجان فيرتل وماتياس بار. ويصف المصممون ابتكارهم الثلاثي الأبعاد الرائع كأحد الابتكارات التي يعزز مظهرها «الرابطة المتزايدة بين الطبيعة والصيغ الرياضية». استُلهِم شكل هذه الطاولة من أنماط النمو والتركيب المنتظمة لفروع الأشجار، وصُنِعت الطاولة كقطعة واحدة مطبوعة بنحو ثلاثي الأبعاد — من دون مُفصَّلات أو وصلات — باستخدام الطباعة الفراغية وراتينج البلاستيك نصف الشفاف، ويوضح مصمموها أن «إنتاجها كان مستحيلًا باستخدام وسائل التصنيع الأخرى.»

تُعتبر طاولة فراكتال تي رائعة هندسية؛ فالسيقان المتداخلة كسيقان الأشجار تسير في جسم الطاولة بالكامل، وتتفرع لأفرع أصغر فأصغر حتى تزداد كثافتها كلما اتجهت لأعلى، ويذكِّرنا جسم الطاولة نصف الشفافة بعُصارة الأشجار المتجمدة. وقد عُرضت



طاولة قهوة شكلها قائم على لوغاريتم يحاكي تركيب ونمو فروع الأشجار (الصورة مهداة من إم جي إكس، أحد أقسام شركة ماتيريالايز ومن تصميم جيرنوت أوبرفيل وجان فيرتل وماتياس بار).

الطاولة في عدة متاحف راقية؛ مثل متحف فيكتوريا وألبرت في لندن، ومتحف المتروبوليتان للفنون في نيويورك، ومتحف ديزاين هاب في برشلونة.

إذا تصفحت موقع شركة شيبوايز، فستجد أن المجوهرات المطبوعة بنحو ثلاثي الأبعاد من أشهر الأشياء في السوق؛ فالمجوهرات تتسم بصغر حجمها نسبيًّا، وحقيقة أنها ليست مصنوعة لغرض مهم — أي أن حياة البشر لا تعتمد عليها مثل أجزاء الطائرات المطبوعة بنحو ثلاثي الأبعاد — جعلتها مُنتجًا شهيرًا للتصميم والطباعة.

أحد أوائل المصممين وأكثرهم شهرة في مجال الطباعة الثلاثية الأبعاد هي باتشيبا جروسمان. تصمم باتشيبا المنحوتات والمجوهرات والمنتجات المنزلية التي تُمثِّل أشكالها الهندسية قوانين رياضية وفيزيائية شهيرة، وتمتلك تصميماتها فكرة عامة واحدة وهي الرياضيات.

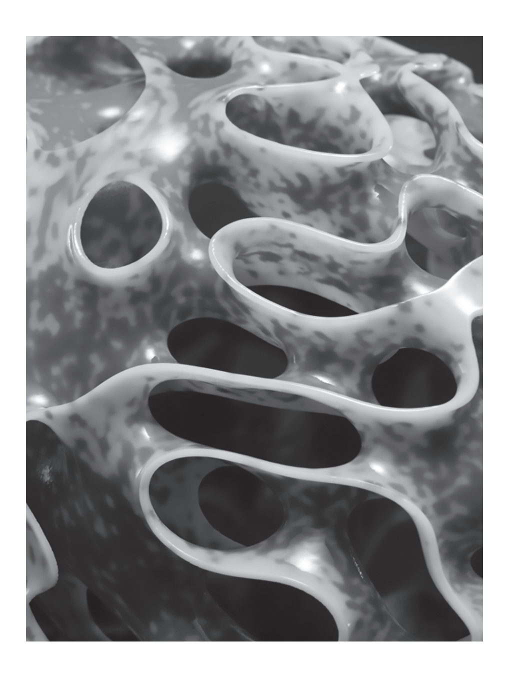
تقول باتشيبا على موقعها الإلكتروني: «أنا فنانة تستكشف المساحة بين الفن والرياضيات.» من تصميماتها الأساسية التصوير المادي لخوارزمية حسابية شهيرة، وهي



صممت باتشيبا جروسمان هذه القطعة المطبوعة بنحو ثلاثي الأبعاد لتمثل مفهومًا رياضيًّا يُدعى «زجاجة كلاين» عدلته ليصبح فتاحة زجاجات (الصورة مهداة من باتشيبا جروسمان).

حلقات بورومين، وهو مدلاة مكونة من ثلاث دوائر متداخلة لا تتلامس حوافها أبدًا. ومثل مدلاة حلقات بورومين، فإن معظم ابتكارات باتشيبا تمتلك أشكالًا هندسية داخلية دقيقة ومتكررة، يجب تصنيعها بطابعة ثلاثية الأبعاد. ولا يمكن للطرق التقليدية لصنع المجوهرات مثل قوالب الشمع أو اللحام صنع غرف داخلية مجوفة متكررة.

تختص شركة التصميم أونيلينو بتصميم المجوهرات والمنحوتات الكسرية القابلة للطباعة بنحو ثلاثي الأبعاد، والتي يقل ثمنها عن حد المائة دولار، الذي يقدِر عليه معظم المستهلكين. الواجهة التِّجارية لأونيلينو التي تتيحها شركة شيبوايز بها العديد من المعروضات؛ مثل المدلات المتشعبة المصنوعة من معادن مختلفة، التي تُمثِّل كلٌّ منها نموذجًا حسابيًّا. وتُعتبر شجرة فيثاغورس حاملًا للمجوهرات؛ فتصميمها القائم على خوارزمية للأفرع المثلثة المدببة، عبارة عن حامل للقلادات والأقراط وغيرها من الحُلي.



تُعتبر نيري أوكسمان، الأستاذة بمعهد ماساتشوستس للتكنولوجيا، من الباحثين البارزين في مجال التصميم التوليدي، وهي تستخدم الطباعة الثلاثية الأبعاد لصنع أشكال مصممة حسب خوارزميات حسابية لصنع هيئات لم يكن صنعها ممكنًا بالمواد الخام التقليدية مثل الخشب والزجاج والصلب (الصورة مهداة من نيري أوكسمان ودبليو كارتر (معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا) وجو هيكلين (شركة ذا ماثووركس) ومركز بومبيدو في باريس بفرنسا، ومن تصوير يورام ريشيف).

أُسست شركة نيرفس سيستم عام ٢٠٠٩ على يدَيْ خريجَيْ معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا، جيسيكا روزنكرانتز وجيسي لوي-روزنبرج، وتتخصص في التصميم التوليدي. وهي تصمم النماذج الرياضية التي تقوم عليها تصميمات منتجاتها المنزلية ومجوهراتها المطبوعة بنحو ثلاثي الأبعاد. وتُعتبر منتجاتها، التي تُعد تصويرًا براقًا وراقيًا للطحالب والشعاب المرجانية والخلايا والأوردة، مستوحاة من قوانين الطبيعة. وهي تشارك أنظمتها الرياضية مع عملائها عن طريق تطبيق مصغر تفاعلي، والذين يمكنهم استخدامها لتصميم منتجاتهم الخاصة المتفردة.

يصف جوش هاركر، مصمم وفنان مستقل، نفسه كفنان ونحَّات كلاسيكي «يستخدم البِتَّات، الواحد والصفر؛ للتعبير عن نفسه بأسلوب بشري لصنع شيء جديد.» تعرفت على أعمال جوش عبر موقع التمويل الجماعي «كيك ستارتر» حيث جمع مبلغًا قياسيًّا لتمويل مشروع نحت يسمى «كرانيا أناتوميكا فيليجري» وهو عبارة عن جمجمة بيضاء مطبوعة بنحو ثلاثي الأبعاد مصنوعة من البلاستيك ومخَرَّمة بنحو منمق وتزييني. عندما تحدثنا عبر الهاتف، اكتشفت أنه نشأ في وادي نهر المسيسيبي في ولاية إيلينوي. وصف جوش طفولته البوهيمية التي تضمنت «العيش في الفترة التي تلت الستينيات من القرن الماضي في مجتمع مشترك خارج النطاق الحضاري، وجليسات أطفال عنيفات، وانغماسًا فنيًّا كاملًا ومآسيَ عائلية». اليوم، جوش فنان متفرغ ونحات رقمي بارز. يقول جوش: «معظم ما أصممه رقمي.»

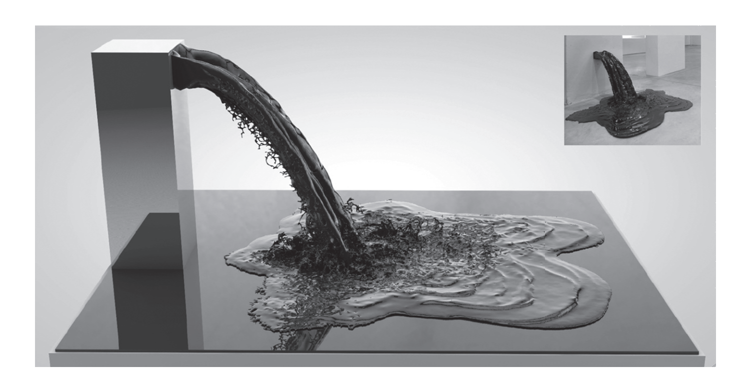
تعلَّم جوش كيف يستخدم برامج التصميم والطابعات الثلاثية الأبعاد منذ عدة سنين مضت عندما كان يمتلك ويدير شركة تصميم للمتاجر الصغيرة. يقول جوش: «لا أدري كيف يمكن للمصمم البقاء في السوق هذه الأيام من دون إتقان استخدام الأدوات اللازمة لذلك.» بعد مرور نحو عَقد له في المجال، أصبح من الصعب للغاية مقاومة العودة إلى الفن والنحت. في عام ٢٠٠٨، تفرَّغ للفن لاستكشاف حبه للنحت الرقمي والطباعة الثلاثية الأبعاد.

استخدم جوش في البداية الطباعة الثلاثية الأبعاد لصنع أشكال هندسية معقدة ينشئها على الكمبيوتر. يقول جوش: «اعتدت صنع أشكال هندسية على الكمبيوتر كانت شديدة التعقيد بدرجة يصعب معها صنعها. وكنت أرسم تصميمات لسنوات، لكنها كانت شديدة التعقيد بدرجة يصعب نحتها يدويًّا. لا ينجح هذا، سواء كنت أستخدم الطين أو الخشب أو الصخر.»

يعكس بعض منحوتات جوش دراسته الكلاسيكية مثل التماثيل العارية ودراسات الشخصيات. ويُصمَّم العديد من منحوتاته رقميًّا ويُطبَع بنحو ثلاثي الأبعاد. وتعكس مجموعته «عُقد وحبائك» افتتانه بإمكانيات التصميمات المحتملة المتأصلة في تشكيلات الطبيعة مثل الجذور أو الكروم أو الشبكات العصبية أو أنظمة الأوعية القلبية.

يقول جوش: «أنا محظوظ بوجودي في العصر الذي يحدث فيه هذا.» ويضيف مؤكدًا: «إنه عصر ثوري للفنون. لم توجد مِن قبلُ إمكانية تطوير وإعادة إنتاج لهذه الأشكال من التعقيد العضوي. أتطلَّع قُدمًا لأرى ما سيأتي مستقبلًا.»

يمكن للعمليات الفيزيائية غير الحيوية إنتاج أشكال كذلك. إيال جيفر من تل أبيب يصنع ما يسميه «فن الكوارث». باستخدام خوارزميات محاكاة، يُعيد إيال بناء لحظات مأساوية عابرة عادةً ما تختفي في طرْفة عَين. وباستخدام طابعة ثلاثية الأبعاد، يمكنه تجسيد هذه اللحظات على أرض الواقع، بكل قوتها؛ على سبيل المثال، حادث سيارة أو تسرب نفطي. أثر القيام بهذا هو تجميد الوقت في الواقع المادي.



شلال نفط. استخدمت محاكاة السوائل للنفط لحساب أبعاد الشكل الهندسي ثم جُمِّدت لصنع النموذج المطبوع (الشكل الداخلي) (الصورة مهداة من إيال جيفر، كافة الحقوق محفوظة ٢٠١٢، www.eyalgever.com).

## (١-١) الموضة: نِعال مُحسَّنة وأحذية مستدامة

أحد أقوى تطبيقات التصميم التوليدي هو استخدام خوارزميات الكمبيوتر للعثور على أفضل وأمثل حل لمشكلة ما؛ فبالتكرار السريع واختبار احتمال وراءَ احتمال، يمكن للكمبيوتر إنتاج مواصفات تصميم تؤدي طباعتها بنحو ثلاثي الأبعاد لصنع جسم محسَّن يلاءم شخصًا أو بيئة ما. ويُعتبر تصميم الموضة مجالًا ملائمًا للتصميمات المتناسقة المحسَّنة المطبوعة بنحو ثلاثي الأبعاد. زرنا كلية الموضة في لندن لمعرفة المزيد عن أحدث صيحات الأحذية المطبوعة بنحو ثلاثي الأبعاد.

بدأ لقاء ما بعد الظهيرة في الكلية عندما دخل فيليب ديلامور وبعض الطلاب وقدموا أنفسهم لنا، ثم وضعوا حذاءين على طاولة الاجتماعات. أوضح فيليب أن الحذاءين

المطبوعَيْن نتاج مشروع تصميم لأحد الطلاب لنَيل درجة الماجستير. كان كلا الحذاءين مطبوعَيْن بنحو ثلاثي الأبعاد، وكانا ثمرة التعاون بين الكلية وشركة برمجيات تصميم في لندن اسمها «ويذين تكنولوجيز».

يدير فيليب استديو التصميم الرقمي بالكلية؛ حيث يجرب الطلبة التقنيات المتقدمة؛ مثل غرفة تصوير الجسم بالكامل، ومؤخرًا الطباعة الثلاثية الأبعاد. يقول فيليب: «تصبح شركات تصميم الموضة أكثر مشاركة واهتمامًا بالعاملين في المجال.»

بغضِّ النظر عن عامل الراحة، فإن الحذاءين لم يكونا كأي حذاء رأيته من قبلُ. أنا لست من متابعي الموضة بأي حال من الأحوال، لكن هذين الحذاءين كانا شيئًا مختلفًا تمامًا، ويُعتبران تحولًا واضحًا عن آلاف السنوات من التصميمات التقليدية. أحد الحذاءين كان أسود اللون ومغطًّى بأشواك قصيرة تشبه تلك التي تكون على ظهر حيوان النيص أو ربما سريرًا من المسامير. أخبرنا المصمم، روس باربر، قبل اللقاء بأسابيع أن هذا الحذاء ارتداه عارض أزياء في أحد العروض.

أخبرنا روس أن ما يجعل حذاءيه متفرِّدين ليس شكلهما لكن الجهد الهندسي والتصميمي الذي بُذِل فيهما. تصنع الشركة التي ساعدت برامجها في تصميم الحذاءين — ويذين تكنولوجيز — حلولًا تصميمية قائمة على تصميمات الطبيعة. على سبيل المثال، يتضمن أحد المشروعات الحديثة للشركة تعزيز التبادل الحراري لمجموعة محرك معدِنية. درس مهندسو الشركة حركة تدفق المياه داخل خياشيم الأسماك لصنع مجموعة محرك فعالة جدًّا وتتميز بأشكال داخلية هندسية مموجة وخيشومية الشكل.

أوضح روس لنا أنه لا يوجد أي صمغ يربط أجزاء حذاءيه المطبوعين بنحو ثلاثي الأبعاد معًا؛ فقد طُبعا من بوليمر شديد التحمل عادةً ما يُستخدم في صنع الأجزاء الصناعية البديلة. ولتحسين عامل الراحة، خاطَ روس حذاءً جلديًّا داخليًّا يدويًّا حصل عليه من أحد متاجر أحذية الرجال. النتيجة هي غطاء قدم مهجَّن بجزء علوي تقليدي، بينما وُضعت الأربطة ولسان الحذاء داخلَ غِلاف مطبوع بنحو ثلاثي الأبعاد.

مرر فيليب الحذاء على الحاضرين حول الطاولة. حملتُه بيدي متعجبًا من خفة وزنه، ورغم جاذبية الحذاء كتعبير عن الموضة اللافتة للانتباه، فإن الحذاء كان تطبيقًا رائعًا لاستخدام البوليمر المتين والمستخدم في مجال الهندسة وخوارزميات ويذين تكنولوجيز المعقدة.

كان أنتوني روتو، مدير التكنولوجيا التنفيذي في شركة ويذين، يزور الكلية أيضًا عصر ذلك اليوم. قال أنتوني إنه وروس عدلا إحدى خوارزميات التصميم التي كان



حذاء مطبوع بنحو ثلاثي الأبعاد صممه روس باربر في كلية الموضة في لندن وحُسِّن بواسطة شركة ويذين تكنولوجيز. خِيطَ الحذاء الجلدي الداخلي يدويًّا لجعل الحذاء أكثر راحة عند ارتدائه على ممشى عرض الأزياء (الصورة مهداة من روس باربر).

يستخدمها مصممو الشركة عادةً في صنع أجزاء طبية بديلة خاصة بتقويم العظام؛ مثل مفاصل الوَرِك الصناعية. ولمواجهة تحدي التصميم الخاص بصناعة حذاء خفيف الوزن ومتين في آنٍ واحد، عدَّل روس وأنتوني خوارزمية صنع المفاصل الصناعية لتحسين تركيب وشكل نعل الحذاء.

بعد شهور من العمل والمحاولات، صمم وطبع روس وأنتوني حذاءً جذاب المنظر وخفيف الوزن ومريحًا ومتينًا. أوضح أنتوني أن نعل الحذاء يُمثِّل عملية التصميم التوليدي على أرض الواقع: كان النعل قد صُنع بشكل يشبه الشبكة أو التعريشة. هذه الشبكة المصممة حسب مواصفات خاصة هي ما جعل الحذاء خفيف الوزن لكنه قابل للتحمل أكثر من النعل القاسي المطاطي التقليدي.



حذاء نمطي مطبوع بنحو ثلاثي الأبعاد من تصميم هون تشانج (الصورة مهداة من هون تشانج).

عندما يسمع العديد منا كلمة «شبكة»، يتخيل حديقة زهور أو كرمة عنب خضراء مزِهرة تتسلق هيكلًا شبكيًّا أبيض. هذه هي الشبكة ثنائية الأبعاد، وهي سهلة الإنتاج باستخدام طرق التصنيع التقليدية، لكنْ حتى ظهرت الطباعة الثلاثية الأبعاد في مجال التصميم، كانت الشبكات الثلاثية الأبعاد مستحيلة الصنع.

تُعتبر الشبكات تركيبًا هندسيًّا أساسيًّا يُستخدم في نطاق عريض من التطبيقات بطريقة تشبه استخدام العجين الخام كأساس للمعجنات. تُعتبر التركيبات الشبكية مثالًا كلاسيكيًّا للتصميم التوليدي. وهي تصمم من خلال خوارزمية حاسوبية تُنتج أوتوماتيكيًّا تركيبًا متكررًا بنحو منتظم أو شبه منتظم أو عشوائي. بعض التركيبات الشبكية الثلاثية الأبعاد تتضمن شكلًا هندسيًّا داخليًّا زاويًّا مكونًا من أشكال منتظمة متكررة متناهية الصغر (مثل المثلثات المجسمة) بينما يبدو البعض الآخر كتشابكات عشوائية من الألياف.

بعد إنهاء روس لعرضه، تحولنا للحذاء الثاني الموجود على الطاولة. كان الحذاء مطبوعًا بنحو ثلاثي الأبعاد كذلك، وكان صندلًا نسائيًّا مفتوحًا من الأمام، بكعب مدبب وطويل جدًّا، ولونه أبيض باهت، وجزء علوي ناعم بلون الخوخ. صمم الطالب هون تشانج هذا الحذاء تحت إشراف فيليب. قال هون إن مشروع التصميم خاصته اتبع أسلوبًا مختلفًا، لا يركز كثيرًا على التركيب الداخلي للحذاء ومتانته، وإنما يركز أكثر على جاذبيته وتصنيعه.



الجيل القادم من ملابس البحر: ثوب سباحة مطبوع بنحو ثلاثي الأبعاد من تصميم جينا فيزيل وماري هوانج من شركة كونتينيوام (الصورة مهداة من جينا فيزيل وماري هوانج من شركة كونتينيوام).

كان هون، مثل الكثير من المصممين، يحب حقيقة أن طباعة أفكاره التصميمية بنحو ثلاثي الأبعاد أكسبته تحكمًا أكبر في عملية التصنيع. وفي وقت مبكر من الفصل الدراسي، فكر هون في البداية في استخدام القولبة بالحقن لصنع حذائه. زار هون مصنعًا للأحذية في إسبانيا، وشاهد الضرر البيئي الذي يسببه الصمغ والعمليات الكيميائية الأخرى التي يستخدمها المصنع.

لجأ هون للطباعة الثلاثية الأبعاد، ووجد أن التصنيع بالإضافة مكَّنه من صنع حذاء من مكونات نمطية. كانت مكونات الحذاء قابلة للاستبدال حتى يمكن لمن ترتديه تفكيك الحذاء الذي تمتلكه واستبدال الكعب بلون مختلف؛ لصنع مظهر جديد تمامًا. الأجزاء

النمطية القابلة للتفكيك لا تحتاج كذلك للصقها معًا بالصمغ، وهو ما يُعتبر جانبًا إيجابيًّا فيما يتعلق بالبيئة.

## (١-٢) المحاكاة الحيوية

على مدار معظم التاريخ المسجل للتصميم في العالم الغربي، نظر الناس إلى الطبيعة والتكنولوجيا كقطبَيْن متنافرَيْن. كان يُنظر إلى الطبيعة كشيء عشوائي وغير قابل للتوقع، وقوة تحتاج إلى الكبح، أما التصميم، فكان عملية تنظيم لفوضى الطبيعة بوضع بصمة العقلانية الإنسانية على المواد الخام. فكر في أسلوب تصميم الأثاث المزخرف للعصر الباروكي أو الأيقونات الموجودة في الكنائس الأرثوذوكسية الروسية رائعة المنظر والمطلية بالذهب، والتي صُورت تفاصيلها بعناية شديدة.

صحيح أن التصميم المعماري الحديث تبنَّى الأشكال المتناسقة والمستوحاة من الطبيعة منذ عقود مضت، لكن الجميع لا يتفقون على أن الدور الابتكاري للمصمم المعماري كمصمم يجب أن يكون إرشادَ وتنظيمَ تطبيق الخوارزميات القائمة على علم الأحياء لحل مشكلة تصميمية؛ وهذا ما يجعل التصميم التوليدي مثيرًا للجدل وثوريًّا.

إذا كان «التصميم التوليدي» هو عملية صنع أشكال وأنماط ثلاثية الأبعاد بتكرار القواعد والقيود الرياضية، فمن يصنع التصميم إذن: الكمبيوتر أم الإنسان؟ ربما يقول البعض إن التصميم التوليدي ليس عملية تصميم في الواقع؛ بسبب أن نواتجه تُعد حصيلة عمليات تكرار لنماذج رياضية؛ فالكمبيوتر ينفذ فقط الصيغ والبيانات ليختبر قدراتها، لكن الفنان هو من صمم هذه القواعد.

إن عملية تطورية هي التي «صَممت» شكل صَدفة المحار للبقاء في بيئة بحرية صعبة، وهي عملية استغرقت ملايين السنين، وتضمنت مليارات تكرارات التصميم (أو الأجيال الجديدة). وبمساعدة الكمبيوتر والبيانات وتقنيات الطباعة الثلاثية الأبعاد، يفترض المصممون قيامهم بدور العملية التطورية؛ فيمكن للمصممين أَتْمتة مجموعة من قواعد التصميم ومراقبة الأشكال الناتجة، وهي تتكون وتتحول إلى نمط. ويمكن للمصمم تطبيق نفس القاعدة لتكرار عملية التصميم مرات عديدة، ويمكن له كذلك تنويع قواعد التصميم واختيار القواعد التي تُنتج أفضل منظر أو أكثر النتائج إثارة للاهتمام. وتجعل التقنيات الجديدة المصممين والفنانين والمهندسين المعماريين يَضْطلعون بدور جديد ويتبنَّوْن طريقة جديدة من التفكير في التصميم.

إن جيني سابين مصممة معمارية رائدة وأستاذة للهندسة المعمارية في جامعة كورنيل. تستكشف بحوثها التداخل بين الأنظمة الحيوية والحوسبة وتصميم تركيبات المواد. أجرينا مقابلة مع جيني لمعرفة المزيد عن عملية التصميم التوليدي والهندسة المعمارية. قالت جيني: «في السنوات الأخيرة، شهدت عمليات التصميم في الهندسة المعمارية انتقالًا من التصميم الإنشائي للتصميم التوليدي. وأصبحت برامج الابتكار والمحاكاة جزءًا من عملية التصميم.»

حصلت جيني على درجة الماجستير في الهندسة المعمارية من جامعة بنسلفانيا ودرَّست تلك المادة هناك لست سنوات. أثناء دراستها للحصول على تلك الدرجة العلمية، وجدت نفسها منجذبة للتقلب والنطاق الابتكاري غير المستكشف تقريبًا للتصميم التوليدي بمساعدة الكمبيوتر والطباعة الثلاثية الأبعاد. تقول جيني: «أحد الأمور المثيرة بشأن التصميم التوليدي هو أنك لا تدري النتيجة النهائية بالضبط حتى تحين النهاية.»

أحد مشروعات جيني البحثية التعاونية الحالية مشروع يُدعى «إي سكين» ويستخدم البيانات الخلوية لاستلهام تصميمات لمواد بناء مرنة. تستخدم جيني وفريقها الطباعة الثلاثية الأبعاد لاستكشاف والتقاط السلوك الحيوي في النماذج التوليدية القائمة على المُكوِّنات. طلبنا المساعدة من جيني لفهم دور التصميم التوليدي المستوحى من الطبيعية في طباعة الجيل التالي من مواد البناء.

تقول جيني: «الهدف الأكبر لمشروع إي سكين هو فهم كيف يمكن أن تصبح الأبنية أكثر حيوية في الطريقة التي تتفاعل وتتكيف بها مع البيئة المحيطة.» يوفر العلماء في المشروع كَمِّيات ضخمة من البيانات، التي تُجمَع من الخلايا البشرية الموضوعة على ركائز مُهندَسة، صممها علماء المواد في الفريق. بعد ذلك، يحاول المهندسون المعماريون في الفريق القيام بـ «الهندسة العكسية» للسلوك الملاحظ؛ حيث يصممون «خوارزميات» لمحاكاة السلوكيات والعمليات الخلوية التي أنتجت التركيب الملاحظ. يطبق الفريق بعد ذلك هذه الخوارزميات لإنتاج حلول تصميم جديدة محتملة على نطاق أوسع.

يقوم المشروع على الاعتقاد بأن النشاط الخلوي يمكنه مساعدة الناس في تعلُّم كيفية تصميم مواء بناء أكثر توفيرًا للطاقة يمكنها الاستجابة للظروف البيئية المتغيرة مثل الخلايا. في إحدى الرسائل الإلكترونية، أوضحت جيني ذلك قائلةً:

> تَعرف الخلايا كيف تستجيب للتغيرات البيئية وتتكيف معها، سنلتقط نحن هذه التحركات ونحوِّلها إلى هيئة رقمية، وفي النهاية نُخرج الناتج باستخدام

طابعة ثلاثية الأبعاد. ستتيح لنا تلك الطابعة استكشاف السلوكيات والعمليات الحيوية عبر قيود المواد الخام والتصنيع أثناءَ الوقت الفعلي. إننا لا نستخدم تلك الطابعة كأداة تمثيل بقدر ما نستخدمها لاستكشاف العلاقات بين الجزء والكل في شكل مكونات قابلة للتكيف.



جسم مطبوع بنحو ثلاثي الأبعاد مستوحًى تصميمه من التركيب الخلوي (الصورة مهداة من جيني سابين).

ينتمي هذا المشروع البحثي إلى عائلة من الأساليب تسمَّى «المحاكاة الحيوية». تصف الكاتبة الأمريكية المتخصصة في العلوم الطبيعية، جانين بينيوس، المحاكاة الحيوية بأنها «عملية تعلُّم من تصميمات الحياة ثم تقليدها. إنها عملية ابتكار مستوحاة من الطبيعة.» معظم الحماس المتعلق بالتصميم بمساعدة الكمبيوتر والطباعة الثلاثية الأبعاد نابع من الأمل في أننا سنتكمن أخيرًا من الطباعة الثلاثية الأبعاد لأجسام ذات أشكال محسَّنة من أجل بيئتها أو استخدامها.

ومع تقدم التكنولوجيا، نستمر في العودة إلى الطبيعة للحصول على الإلهام، وتمثل تصميمات الطبيعة حلولًا رائعة وعملية لتحديات الواقع. وكما قال مهندس التصميم المعماري، مايكل بولين، في مؤتمر تيد عام ٢٠١٠: «يمكنكم النظر إلى الطبيعة ككتالوج لمنتجات استفادت من ٣٫٨ مليار عام من البحث والتطوير.»

## (١-٣) التصميم سريع الاستجابة

في كلية أخرى للهندسة المعمارية في وسط لندن، يطبع الطلاب بنحو ثلاثي الأبعاد تركيبات تشبه أقراص العسل، ونماذجَ أولية معمارية مستقبلية على شكل قِباب. زرتُ كلية الرابطة المعمارية للهندسة المعمارية أثناءَ زيارتي للندن. كانت الكلية مخفية جيدًا ضمن عدة منازل متشابهة كبيرة مصنوعة من الحجر الرَّمادي، وكانت تبعُد بضع بنايات سكنية عن ميدان ترفالجر. اكتشفت لاحقًا أن الكلية اشترت هذه الصفوف من المنازل منذ عدة سنوات قبل أن ترتفع أسعار البيوت في لندن بنحو فلكي كما هو الحال اليوم. إذا وقفتَ في الشارع، فإن الشيء الوحيد الذي يدل على وجود الكلية هو لافتة تتدلى على استحياء من أحد البيوت الحجرية الرَّمادية.

في وقت لاحق عبر البريد الإلكتروني، تعرفت على أستاذ النمذجة الأولية الرقمية في الكلية، يرون فان أمجيد، الذي كان من المفترض أن ألتقيَ به. كان وراءَ باب الكلية الأمامي رَدهة تقود إلى مِنطقة استقبال مُشْمِسة وصاخبة. في اليوم الذي كنتُ فيه هناك، كان المكان مليئًا عن آخره بالطلاب التوَّاقين للالتحاق بالكلية؛ حيث سلَّموا أوراق التقديم وحافظات التصميمات النفيسة الملفوفة بورق بُني اللون.

إن يرون فان أمجيد أحد الخبراء المقيمين المتخصصين في التصميم والطباعة الثلاثية الأبعاد. وبعد التعارف، قادني من مِنطقة الاستقبال للأسفل عبر مجموعة سلالم إلى وحدة النمذجة الأولية الرقمية، وهي عبارة عن مجموعة من الغرف الغائرة تحت الأرض المتصلة ببعضها، والتي تقع في الجزء الخلفي من الكلية. غطت عدة آلات تصنيع صغيرة أسطح الطاولات، بينما تدلت منحوتات تجريدية مطبوعة بنحو ثلاثي الأبعاد من السقف، وكان معظم الأسطح الأفقية في المكان ملأى بمنتجات تجارِب تصميم وطباعة ثلاثية الأبعاد غريبة الشكل.

لم تكن غرف الوحدة دائمًا مخصصة للأغراض التعليمية. أخبرني يرون أن هذه الغرف استضافت حفلة لفرقة بينك فلويد الموسيقية في السبعينيات. قبل ذلك، وفي الخمسينيات، اعتاد طلبة الهندسة المعمارية إقامة حفلات رقص حيث توجد آلات التصنيع الآن.

استعانت الكلية بخدمات يرون منذ خمس سنوات لتدريس التصميم والنمذجة الأولية الرقمية. قال يرون: «كانت الإثارة تستحوذ عليَّ عندما وصلت هنا، كان هناك طلب

ضخم ومكبوت على منهج تصميم يعتمد على الكمبيوتر بنحو كبير، وكان من المنطقي بالنسبة إلى من في الكلية أن تكون الطابعة الثلاثية الأبعاد ببساطة امتدادًا للكمبيوتر كأداة تصميم أساسية.»

هناك مذهبان رئيسيان للتصميم المعماري على مدار تاريخه: الأول يرى أن التصميم المعماري فن، والثاني يرى أنه عملية تحليلية مرتبطة أكثر بالهندسة. يقول يرون: «كان التصميم بمساعدة الكمبيوتر بالفعل جزءًا من المنهج لسنوات عديدة، ما كان جديدًا هو فكرة أن الكمبيوتر له دور في عملية التصميم الفعلية، وأنه يمكننا تطبيق الخوارزميات لمساعدتنا في تصميم وصنع تركيبات وهياكل جديدة.»

يضيف يرون: «بعد وصولي إلى هنا بسنتين أو ثلاث، تسللت النمذجة الأولية الرقمية إلى كل المناهج هنا بنحو غير مباشر. يدرك الناس أن برامج التصميم والطابعات الثلاثية الأبعاد ليست غاية في حد ذاتها لكنها مجرد أداة لدعم المنهج الذي ينوون تدريسه بالفعل.»

يضيف يرون: «يحسِّن الكمبيوتر من عملية التصميم المعماري، وأنا أسمي هذا التفكير الثلاثي الأبعاد. بدأنا الآن في الحصول على التقنية التي نحتاج إليها لالتقاط التعقيد الحقيقي للأجسام — البيانات — ثم يمكننا البدء في استخدام هذا وتحويله إلى خوارزمية ثم إلى جسم مصمم.»

يضيف يرون — ملخِّصًا بكفاءة الدورَ الجديد والمتنامي للبيانات في عملية التصميم: «اللحظة المنتظرة في أي مشروع تصميم هي عندما تتدفق البيانات.» أصبحت الكمِّيات المتزايدة من البيانات أكثر من أي وقت مضى هي المادة الخام للتصميم «الذكي» القائم على الخوارزميات والطباعة الثلاثية الأبعاد. تتدفق البيانات في عملية التصميم المعماري من مصادر عدة. أصبح المسح بالليزر جزءًا تقليديًّا من عملية التصميم المعماري هذه الأيام، كما تُمثِّل أجهزة الاستشعار مصدرًا آخر متناميًا وغنيًّا للمعلومات.

أوضح يرون أن رؤيته طويلة الأمد (التي يتطلب تحقيقها أكثر من فصل دراسي واحد أو اثنين بالطبع) هي تصميم طابعة ثلاثية الأبعاد سريعة الاستجابة. يتخيل يرون طابعة ثلاثية الأبعاد للبناء يمكن استخدامها في موقع البناء لطباعة المنازل والهياكل الأخرى بنحو فوري. هذه الطابعة ستستجيب في الوقت الفعلي للبيانات المتدفقة إليها من المستشعرات، وسيتم بنحو سريع معالجة بيانات المستشعرات المتدفقة بواسطة برامج

تصميم ذكية ترشد الطابعة لتصنيع هياكل وتركيبات محسَّنة من أجل الظروف الموجودة في بيئة معينة.

ستستقبل الطابعة الثلاثية الأبعاد سريعة الاستجابة تعليمات تصميم مُحدَّثة باستمرار وتعدل عملية الطباعة طبقًا لهذه التعليمات. ويمكن لبرامج التصميم المستقبلية سريعة الاستجابة باستمرار تعديل بناء الهياكل المطبوعة، كما يمكن لها تعديل شكل مساحة الهيكل لجعله أكثر استقرارًا. وبالإضافة لإرشاد الشكل، فإن برامج التصميم الذكية وسريعة الاستجابة المستجيبة يمكنها كذلك توجيه المواد الخام، أو مجموعة المواد الخام، التي تستخدمها الطابعة الثلاثية الأبعاد.

كيف ستبدو مثل هذه الطابعة أثناء التشغيل؟ شغل يرون على جهاز الكمبيوتر المحمول خاصته فيديو تصوريًّا لها. أظهر الفيديو «رأس طباعة» كبيرٍ يضع طبقة تلو طبقة ليصنع قُبَّة تُشبه خلية النحل بجدرانٍ مموجةٍ وقمة مدببة. جزء من التصميم التصوري لهذا التركيب الموضح في الفيديو كان جدرانًا تحتوي على أعمدة تهوية مطبوعة.

يقول يرون: «ستتضمن عملية التصميم الذكاء، وكلما زادت قوةُ وتعقيدُ برامج التصميم، أصبح من الممكن طباعة هياكل وتركيبات بنحو ثلاثي الأبعاد تحدد أشكالها طبيعة البيئة التي تحتويها.» طريقة أخرى للتفكير في هذه الطريقة ستكون أن برامج التصميم ستعمل كمخطط إلكتروني ديناميكي وسريع الاستجابة «يتحدث» للطابعة الثلاثية الأبعاد داخلَ حلقة تواصل مغلقة.

علمتُ أن يرون يُشرف على مشروع طلابي في الكلية لبناء طابعة ثلاثية الأبعاد كبيرة بما يكفي لطباعة هياكل وتراكيب يصل حجمها لعدة أمتار. وبما أن مثل هذه الطابعة ليست متاحة تجاريًّا بعدُ، فإن يرون وطلابَه يستعينون بآلة حفر وتقطيع بالكمبيوتر، ويحاولون تزويدها برأس طباعة ثلاثية الأبعاد. يستخدم يرون وفريقُه الآلةَ لصنع رأس طباعة يمكنه الدوران والنزول بحرِّية في الفراغ.

ربما ستمر من خمس إلى عشر سنوات قبل أن تصبح الطباعة الثلاثية الأبعاد سريعة الاستجابة واقعًا، حسبما يقول يرون. أظن أن الإنشاء الفعلي لطابعة كبيرة هو الجزء السهل نسبيًّا في المشروع، لكن صنع برامج تصميم ذكية يمكنها الاستجابة واتخاذ قرارات ملائمة في الحال سيستغرق وقتًا أطول.

وعكس العارضة المصنوعة من الصلب التي تُنزل في المكان المراد برافعة بِناء، فإن أي بناء مطبوع بنحو ثلاثي الأبعاد يمكن صنعه من مزيج مخصص من مواد بناء مهيأة لتحمل الضغوط والأحمال التي يواجهها البناء. ومثل عظمة نامية يزيد سمكها عندما

تتحمل وزنًا ثقيلًا، فإن الجسر سريع الاستجابة المطبوع بنحو ثلاثي الأبعاد يمكن زيادة سمكه استجابة للضغط، سواء كان صوريًّا أو حقيقيًّا.

تعبِّر مقالة على مدوَّنة «فابالو» التي تهتم بأخبار التصنيع الشخصي والطباعة الثلاثية الأبعاد عن هذا قائلة: «تخيل عوارض بها مناطق قوية للأحوال التي تحتاج إلى أن تكون فيها كذلك، ومناطق أخرى خفيفة، أو حتى مناطق متفرقة، من دون أي مواد بناء إطلاقًا. يمكن صنع كل قطعة بنحو خاص لمنح أفضل قوة فيزيائية لتنفيذ غرض ما في المبنى بأقل تكلفة من المواد الخام.»[1]

في الوضع المثالي، يمكن صنع الهياكل المطبوعة بنحو ثلاثي الأبعاد من موارد متاحة محليًّا مثل الرمال أو التراب، ويمكن لبرامج التصميم الذكية مزج المواد معًا، وهو فن معقد في حد ذاته. ولكي تصبح الطباعة الثلاثية الأبعاد سريعة الاستجابة واقعًا، سنحتاج إلى مواد بناء أفضل وقدرة حاسوبية كافية لتحليل البيانات وصنع نماذج منها بنحو سريع جدًّا، ولضبط التصميم في الوقت الفعلي.

يمكن للطابعات سريعة الاستجابة المساهمةُ في مواجهة التحديات الاجتماعية؛ فيمكن شحنها لصنع أماكن إيواء للمجموعات السكانية المتنقلة أو اللاجئين أو لمساعدة ضحايا الكوارث الطبيعية. في المواقف غير الكارثية، وبتطور مواد البناء، يمكن للطابعات سريعة الاستجابة صنع منازل صديقة للبيئة ومريحة للمناطق عالية الكثافة السكانية. ويمكن أن يكون البناء الذكي الفوري سريع الاستجابة مفيدًا للأغراض العسكرية واستكشاف الفضاء.

يمكن للطابعات المحمولة سريعة الاستجابة صنع منازل قليلة التكلفة. وطبقًا لمورجان بيك من مجلة «تكسكنولوجست» فإن بناء منزل قياسي من طابقين على مساحة ٢٨٠٠ قدم مربع في الولايات المتحدة يمكن أن يستغرق من ستة أسابيع إلى ستة أشهر. وبينما تُمثِّل مواد البناء جزءًا كبيرًا من تكلفة البناء، هناك مصدر آخر كبير للتكلفة والتعقيدات؛ وهو عملية البناء نفسها وعمال البناء.

تتيح لنا الطباعة الثلاثية الأبعاد وأجهزة الكمبيوتر التعلم من الأنظمة الطبيعية واستغلال قوة النماذج الرياضية في عملية التصميم. يلخص المصمم هيو دابرلي الأمر قائلًا: «لم يعُد التصميم يهتم فقط بالأشياء؛ فقد تزايد اهتمامه بالأنظمة، وفي الوقت الحالي، أنظمة الأنظمة أو الأنظمة الإيكولوجية. بنحوٍ ما، إن هذه الأنظمة حية وتنمو وتتطور معًا.»

## (٢) طباعة حوائط مموجة وأشكال زخرفية مخصصة

هناك بالفعل أبنية مطبوعة بنحو ثلاثي الأبعاد. يطبع الباحثون اليوم بنحو ثلاثي الأبعاد بيوتًا أسمنتية باستخدام برامج التصميم التقليدية وطابعات ثلاثية الأبعاد مخصصة. إن الطابعات الثلاثية الأبعاد المستخدمة في البناء — مثلها مثل نظرائها صغيرة الحجم — يمكنها صنع أشكال كان صنعها حتى الآن مستحيلًا؛ مثل قنوات لتحسين التهوية، وسمات هيكلية مطبوعة سلفًا، ومنحنيات وزخارف رائعة للتزيين.

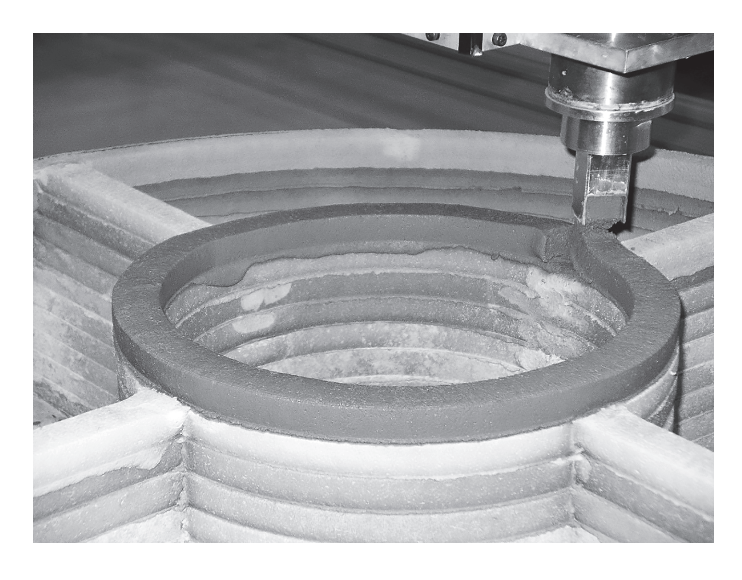
يطبع باروخ كوشنيفيس، الأستاذ بجامعة كاليفورنيا الجنوبية أبنية. منذ عدة سنوات، بدأ هو وطلابه اختبار الطين كمادة بناء. اليوم تطور عمله المبكر لدرجة أنه يمكنه صنع أبنية كبيرة من الخرسانة بطابعة ثلاثية الأبعاد، يُسميها روبوت البناء المستخدم لتقنية «صنع المحيط الخارجي».

يعمل روبوت البناء هذا بنفس المبادئ التي تعمل بها طابعة ثلاثية الأبعاد شخصية مزودة بفوهة تخرج منها المواد الخام. ويتتبع الروبوت المساحة التي سيشغلها البناء بإخراج سيل من معجون الخرسانة المعزز بالألياف. وبتحرك الفوهة في كل مكان، فإن الطبقة السفلى تقسو لتحمل الوزن المتزايد للحوائط المتنامية.

يمكن حاليًّا لتقنية صنع المحيط الخارجي إنشاء بناء ارتفاعه ٧ أقدام بطول ٢٣ قدمًا وعرض ١٥ قدمًا. وحسب تقدير باروخ فإن طابعته يمكنها بناء قدم مربعة من الحوائط في أقل من ٢٠ ثانية. ولوضع دفقات سميكة من خطوط الأسمنت في ثوانٍ، يمتلك الروبوت مِجرفتين دوارتين يمكنهما تنعيم كل طبقة من الخرسانة أثناء طباعتها.

لا يمكن حاليًّا لتقنية صنع المحيط الخارجي تضمين بنية تحتية أساسية داخل الخرسانة الخام مثل المواسير وأسلاك الكهرباء. بالرغم من ذلك، ويومًا ما، يمكن إضافة أدوات بناء أكثر تعقيدًا لتنضم للمِجرفتين اللتين ترشدان الطابعة. على سبيل المثال، يمكن لواضع مواسير آلي إضافي وضع المواسير في الأسمنت القاسي.

تقول إحدى أشهر مقولات كاتب الخيال العلمي بروس سترلينج: «كما يبني النمل الأبيض قلاعًا فوق الأرض، يمكن للروبوتات صنع ناطحات سحاب فوق القمر». وبوضع استكشاف الفضاء في الاعتبار، موَّلت وكالة ناسا عدة مشروعات بحثية تعتمد على روبوتات البناء الخاصة بباروخ للتوصل إلى طريقة جيدة للبناء في الفضاء الخارجي. يحلم باروخ بتشييد أبنية فوق القمر والمريخ يومًا ما، وتوفير مساكن عاجلة وقليلة التكلفة على سطح الأرض.



تُخرج تقنية صنع المحيط الخارجي أسمنتًا معززًا بالألياف من فوهة (الصورة مهداة من باروخ كوشنيفيس من مركز تقنيات التصنيع المؤَتْمت السريع في جامعة كاليفورنيا الجنوبية).

على الجانب الآخر من المحيط الأطلنطي، وخارج مدينة بيزا في إيطاليا، اخترع المصمم والمهندس المعماري الإيطالي إنريكو ديني طريقة بناء بمساعدة الكمبيوتر، قائمة على الطباعة الثلاثية الأبعاد، تستخدم الرمال ومادةً لاصقة صناعية لصنع حجر رملي صناعي. تُعتبر الرمال أحد أكثر المواد الخام الخاصة بالبناء توافرًا في العالم. يصف إنريكو ابتكاراته المطبوعة بأنها ملساء وتشبه الرخام وباردة وصلبة في ملمسها. أطلق إنريكو على طابعة البناء خاصته اسم «نظام دي شيب الآلي للبناء». يدير كمبيوتر موصل بطابعة دي شيب برنامج تصميم بمساعدة الكمبيوتر الذي يرشد الذراع الآلية فوق سرير من الرمال بدقة تصل إلى المِلِّيمتر.

تعمل طابعة دي شيب بإخراج سائل لاصق من مِئات الفوهات الصغيرة فوق سرير من الرمال. يحتوي هذا الخليط على محفِّز يجعل المادة اللاصقة أكثر سرعة في ربط الرمال ببعضها، وبعد أربع دورات، تتصلب الطبقة المطبوعة. وتُنثر رمال جديدة فوقَها،



يطبع إنريكو ديني هياكل من مزيج من الرمال والمواد اللاصقة، والنتيجة النهائية هي سطح حجري قوي وأملس. سيكون من الصعب للغاية نحت هذه الأشكال والمنحنيات يدويًّا من الصخر أو الرخام (الصورة مهداة من إنريكو ديني وأندريا مورجانتي).

ويُعاد معايرة الذراع الآلية حتى يمكنَه ترسيب طبقة أخرى من المادة اللاصقة فوق الأولى، ويستغرق الأمر يومًا تقريبًا لتتصلب الحوائط المطبوعة.

وطبقًا لموقع الويب الخاص بإنريكو، فإن المادة اللاصقة قوية، ويمكن أن تحل محل الحديد كمادة معزِّزة لهياكل البناء. ويمكن أن يُصنع الحجر الصناعي المطبوع بطابعة دي شيب من أي نوع من الرمال، وهو أقوى وأقل تكلفة من الأسمنت البورتلاندي. والبناء المبني من الحجر الرملي المطبوع بنحو ثلاثي الأبعاد أسرع في التشييد من ذلك المبني من مواد البناء التقليدية.

في وقت كتابة هذا الكتاب، لا أعلم هل كان هناك من يسكن في بيت مطبوع بنحو ثلاثي الأبعاد. على الرغم من ذلك، فإن شخصًا ما ربما يخاطر ويقرر استغلال احتمالات



هذا الهيكل الرائع المسمى «المقعد العجيب» مطبوع بنحو ثلاثي الأبعاد من الخرسانة. من المستحيل صنع الأشكال المنحنية والقنوات الداخلية المجوفة الخاصة بهذا الهيكل باستخدام طرق صب الخرسانة التقليدية (الصورة مهداة من سانج وو ليم وريتشارد باسويل ومن تصوير أنييس سانفيتو).

التصميم المتأصلة في البيت المطبوع. ومثل الحرية الهندسية التي تتيحها الطابعات الثلاثية الأبعاد التقليدية لكن على نطاق أوسع، فإن طابعة البناء الثلاثية الأبعاد يمكنها طابعة أشكال فيزيائية غير معتادة وغريبة. تخيَّل العيش في منزل حجري عملاق يشبه البيت الجليدي أو بيوت الهنود الحمر، ويمكنك زخرفة السقف بسخاء أو حتى رسم أشكال زخرفية عليه.

ليس في الإمكان بعدُ طلبُ مخطط لمنزل خرساني مطبوع بنحو ثلاثي الأبعاد، لكن على قياس أصغر، يمكنك البدء بمقعد خارجي بسيط مصنوع من الخرسانة. طوَّر فريق من الباحثين في جامعة لوفبرا (جامعة نوتنجهام حاليًّا) مقعدًا مطبوعًا بنحو ثلاثي الأبعاد من الخرسانة سُمي «المعقد العجيب» بالدمج والتوسع في استخدام أساسيات عمل تقنية صنع المحيط الخارجي.

يتكون تركيب «المقعد العجيب» المطبوع من هيكل يشبه خلية النحل مكون من قنوات وجيوب هوائية داخلية يسميها الباحثون «فراغات». هذه الفراغات تعمل كحوامل للصوت أو عوازل حرارية أو تُوفِّر ببساطة مساحة مفتوحة يمكن وضع مكونات بناء إضافية فيها أو ربما مواسير وأسلاك كهرباء، كما ذكرنا سلفًا. يوفر هذا المقعد لمحة عن الاحتمالات التي تتيحها طباعة هياكل أكبر وأكثر تعقيدًا بنحو ثلاثي الأبعاد. ويمكن للهيكل المطبوع أن يحتويَ على مواسير سباكة وأسلاك ودوائر كهربائية جاهزة، كما يمكن صنعه بحيث يحتوي على فتحات هوائية ذكية أو فراغات بحيث يمكن إضافة بنية تحتية إضافية بسهولة لاحقًا.

## (١-٢) المصمم الروبوتي

يقول المؤلفان ستيفن تود ووليام لاثام في كتابهما الكلاسيكي عن الرسوم المصممة بالكمبيوتر والمسمَّى «الفن التطوري وأجهزة الكمبيوتر»: «لا يتبع الكمبيوتر التعليمات دون تفكير لكنه يستخدمها لإعطاء اقتراحات، ويترك الحرية للفنان لاتخاذ الخيارات الجمالية النهائية.»[2] سيكون للجيل التالي من الأدوات البرمجية الخاصة بالتصميم الذكي نفس الأثر على عملية التصميم.

يومًا ما، سيرشد برنامج تصميم ذكي وسريع الاستجابة أو ما يُطلق عليه «مصمم روبوتي» عملية الابتكار، وسيسرع من اكتشاف حلول التصميم. اليوم، تُوفِّر بالفعل خوارزميات الكمبيوتر حلولًا تصميمية أكثر تعقيدًا من أي شيء يمكن للمصمم البشري التفكير به. في المستقبل، سيغير المصمم الروبوتي — الموصَّل بطابعة ثلاثية الأبعاد ومصدر بيانات — دور المصمم أو الفنان أو المهندس المعماري البشري.

في المستقبل، لن يُضيع البشر وقتًا في وضع واختبار حلول تصميم محتملة. بدلًا من ذلك، سنمد المصمم الروبوتي بتصور على مستوًى عالٍ عن مشكلات التصميم؛ أهدافها وقيودها وسياقها. وسيحدد المصمم البشري ضوابط الحل المرغوب به. وبدلًا من أن يصبح المصممون والفنانون والمصممون المعماريون لا حاجة لهم بسبب الأدوات الجديدة، فإنهم في المستقبل سيقتحمون آفاقًا إبداعية جديدة.

الفصل الحادي عشر

# تصنيع نظيف وصديق للبيئة

يقف رجل يرتدي قبعة مستديرة ونظارة شمسية، في سهل رملي كبير تحت الشمس الحارقة وسماء زرقاء خالية من السحب، وإلى جانبه توجد آلة معدِنية لامعة في حجم محطة حافلات حضرية صغيرة. على سطح الآلة هناك لوحان شمسيان قاتما اللون، وبالقرب منه توجد خيمة صغيرة من النسيج المعدِني تُعَد بمنزلة مكتبه المتنقل.

ينحني الرجل أمامَ ما يبدو مثل حقيبة مفتوحة، ويفك بيديه بصبر مجموعة متداخلة من الأسلاك ذات الألوان الزاهية التي تَبرُز من داخل الحقيبة، وخلف الرجل تقبع الكثبان الرملية الرائعة التي تُبرِز اللون الأبيض اللامع لملابسه.

عندما يفرغ من ترتيب الأسلاك الخارجة من الحقيبة كما يريد، يوصل الحقيبة بالآلة. تتحد أجزاء إطار الآلة المعدِني معًا بواسطة بَكرات معدِنية مغطاة بفويل الألومنيوم؛ مما يذكِّرنا بمفاصل ركبتَيْ ومَرفِقَي الرجل القصدير في فيلم «ساحر أوز».

وبينما تبدأ الطاقة في التدفق من خلال اللوحين الشمسيين، تبدأ تروس الآلة في التحرك. هناك لوح زجاجي سميك مستطيل الشكل يتصل بالإطار المعدِني بذراع قابلة للضبط، وهذا اللوح الزجاجي ما هو إلا عدسة مكبرة عملاقة تركز أشعة الشمس، محولة إياها إلى شعاع ضوء قوي.

باستخدام الذراع المتحركة، يضبط الرجل العدسة المكبرة ويوجه الشعاع تجاه وعاء مليء بالرمال. يوصل الرجل الكمبيوتر المحمول بالآلة، ويتراجع ليراقب ما يحدث. تُحرِّك ذراع الآلة العدسةَ ذهابًا وعودة، وتبدأ الرمال التي تتعرض لنقطة تركيز ضوء لامع قوي في إصدار فقاعات والانصهار. ومثل مقطع فيديو مصور بتقنية اختزال الوقت يعرض بِركة من الحُمَم المنصهرة، تزيد حرارة الرمال حتى تصل إلى ١٥٠٠ درجة مئوية.



يستخدم ماركوس كايسر الطاقة الشمسية لتشغيل طابعته الثلاثية الأبعاد التي تلتقط أشعة الشمس من خلال عدسة عملاقة لإذابة الرمال وتحويلها إلى أشكال. الموقع هو صحراء في المغرب لكن هذا المشهد يمكن أن يحدث في أي مكان يوجد به شمس قوية ورمال وافرة (الصورة مهداة من ماركوس كايسر).

تحدد العدسة العملاقة بانتظامٍ إطار دائرة خارجيًّا يزيد تدريجيًّا وببطء ليصبح شكلًا مجسمًا ثلاثي الأبعاد. تبرد الرمال المنصهرة وتتصلب، وتوضع رمال جديدة فوقَها. وتستمر الآلة في عملها صاهرةً طبقات جديدة من الرمال التي تندمج معًا فوق الرمال الصلبة الباردة. وفي النهاية، يُخرج الرجل جسمًا كبيرًا على شكل قَصْعَة من سرير الرمال ليعلن انتهاء مَهمته.

تصل شاحنة بيضاء من طراز جيب، ويحمل رجال يرتدون عِماماتٍ الآلةَ بسرعة في الجزء الخلفي منها، بينما يصعد خيميائي الرمال الغامض، بقبعته المستديرة المثبتة بقوة برأسه وملابسه التي لا تزال بيضاء ناصعة لم تتلوث، إلى المقعد الخلفي. وبينما تبتعد الشاحنة في الأفق، لم يعد هناك أي أثر لعملية التصنيع التي حدثت من بضع دقائق فوق السهل الرملي.

صُوِّر المشهد الصحراوي هذا في المغرب، والرجل الذي يظهر فيه يُدعى ماركوس كايسر، بينما الآلة هي طابعة ثلاثية الأبعاد تعمل بالطاقة الشمسية، ويسمَّى مشروع التصميم الذي يعمل عليه «التصليد الشمسي». وفي مثال للتصنيع صديق البيئة، فإن المادة الخام للطابعة العاملة بالطاقة الشمسية هي الرمال، التي تنصهر وتتحول إلى زجاج بواسطة العدسة المكبرة.

وكما يصف ماركوس الأمر: «في هذه التجرِبة، تُستخدَم أشعة الشمس والرمال كطاقة ومادة خام لإنتاج الأجسام الزجاجية من خلال عملية طباعة ثلاثية الأبعاد تجمع بين الطاقة والمواد الخام الطبيعيتين وتقنيات إنتاج متقدمة.» شاهدت مقطع الفيديو عدة مرات، وقد فُتِنت بسكون الصحراء الواسعة المريح، والفقاقيع الصادرة من الرمال وضوء الشمس الذي لا يرحم.

من وجهة النظر البيئية، فإن التصليد الشمسي عملية رائعة؛ فهي تعمل بالطاقة الشمسية؛ إن «ليزر» الطابعة هو ضوء شمس مركز. تُعتبر الرمال — المادة الخام المستخدمة — إحدى أكثر المواد توافرًا ووجودًا بنحو طبيعي على ظهر كوكب الأرض. وعندما تنصهر الرمال فهي تتحول إلى زجاج، وهو مادة صلبة ومتعددة الاستعمالات لا تحتاج إلى أصماغ أو إضافات كيميائية أخرى. إذا تم التخلص من جسم زجاجي مطبوع في الصحراء، فسيعود في النهاية لأصله، ويتحول إلى رمال من جديد.

عندما شاهدت مقطع الفيديو، أدركت أن التصليد الشمسي يمكن أن يكون الحل لمشكلةٍ اعتادت أن تحيرني عندما كنتُ طفلًا. نشأتُ في إسرائيل، وهي بلاد مليئة بالسهول الرملية. ويُعتبر بناء طرقٍ فوق رمال الصحراء أمرًا مكلفًا وصعبًا؛ فالرمال لا تتيح قاعدة ثابتة؛ وبينما تتحول وتتناثر في كل مكان، تغطى الطرق وتصبح في النهاية غير صالحة للسير عليها.

عندما كنتُ طفلًا، كنت أتساءل لماذا لا تقوم الحكومة بصهر رمال الصحراء محولةً إياها إلى قطع طويلة صلبة يمكن للسيارات القيادة عليها، في نوع من الطرق يمكن أن يُسمى «الطرق الزجاجية». تخيلوا أن آلة التصليد بالشمس الخاصة بماركوس تمتلك إطارات عملاقة وموصلة بنظام تحديد المواقع العالمي، وتُستخدم في طباعة طرق في المناطق الصحراوية. ربما يمكن لـ «رئيس عمال» بشري الإشراف على مجموعة عاملة من آلات التصليد الشمسي. لن تصبح الرمال المتحركة مشكلة بعد ذلك، بدلًا من ذلك، ستعمل تلك الرمال كمادة خام مفيدة، وهي القطران الزجاجي. تستكشف وكالة ناسا عمليات مشابهة لطباعة هياكل بنحو ثلاثي الأبعاد على سطح القمر باستخدام رمال القمر.

في عالم مثالي، فإن أي عملية تصنيع ستكون صديقة للبيئة مثل التصليد الشمسي. لكن لسوء الحظ، فإن معظم التصنيع يعمل بالطاقة القائمة على النفط، وتترك المصانع وشبكات المواصلات العالمية (والتي تسمَّى سلاسل التوريد) وراءها كَمِّيةً هائلة من الكربون تساهم في زيادة غازات الدفيئة.

على الرغم من ذلك، فإن عملية التصنيع مجرد جزء من المشكلة؛ فالمخلفات تُعتبر أثرًا جانبيًّا آخر لعملية الإنتاج الواسع النطاق الذي يُعَد كارثيًّا بالنسبة إلى البيئة. المنتجات الرخيصة المتوافرة التي تُصنع بأعداد كبيرة، تُصنع فعليًّا لتُرمى في القمامة. المشكلة هي أنه لا يمكن التخلص من المخلفات بنحو نهائي. صحيح أنه يمكن إعادة تدوير الزجاج والورق — وهذا يحدث بالفعل — لكن معظم المنتجات البلاستيكية المنتَجة بأعداد كبيرة لا يُعاد تدويرها ولا تتحلل حيويًّا مرة أخرى بحيث تعود إلى البيئة؛ فهذه المنتجات تظل موجودة لعقود، وتملأ مدافن المخلفات وتُلوث المحيطات.

تتيح لنا تقنيات الطباعة الثلاثية الأبعاد طريقة أقل تلويثًا للبيئة وصديقة أكثر لها لتصنيع الأشياء، لكن ليس هناك تقنية صديقة للبيئة بطبيعتها. ما يهم هو كيفية استخدامها.

## (١) حكاية لعبتين من البلاستيك

إذا سلمك شخص لُعبتين بلاستيكيتين لهما نفس الوزن والحجم — إحداهما مصنوعة بالإنتاج الواسع النطاق والأخرى مصنوعة بالطباعة الثلاثية الأبعاد — فهل سيمكنك تخمين أي عملية تصنيع منهما أدت إلى أضرار بيئية أقل؟ العديد من الناس سيقفزون لاستنتاج مباشر وهو أن اللُّعبة البلاستيكية المطبوعة بنحو ثلاثي الأبعاد صُنعت بنحو أقل إضرارًا بالبيئة، فهل توافقهم الرأي؟

تكمن الإجابة في دورة إنتاج كل لُعبة أو السلسلة الملتوية للإنتاج وقنوات التوزيع والمتاجر التي تحمل المنتج إلى جهته النهائية، وهي نقطة البيع. تُعتبر نهاية دورة إنتاج المنتج هي التخلص منه عندما يرميه المستخدم.

تخيلوا سيناريو افتراضيًّا يمكن أن تتحدث فيه اللُّعبتان. في هذا السيناريو، يمكنك سؤال اللُّعبتين عن مكان صنعهما وكيف جُمعتا، وأخيرًا، كيف وصلتا إلى الشخص الذي اشترى كلًّا منهما. دعونا نتخيل أن اللُّعبة المنتَجة بنحو واسع النطاق، هي من أجاب سؤالك أولًا.

ستخبرك تلك اللُّعبة كيف بدأت حياتها كمجموعة سائبة من الكريَّات البلاستيكية الصغيرة في حجم بيض السمك تسمَّى الحبيبات البلاستيكية. أحيانًا تهرب هذه الحبيبات البلاستيكية من التغليف وتهبط في المحيطات والأنهار؛ حيث تتسلل إلى قاعدة العوالق المغذية للحيوانات؛ مما يتسبب في اختناق وتسميم الحيوانات والطيور البحرية ببطء. هذه الحبيبات البلاستيكية المكونة للُّعْبة غُذيت بنجاح في آلة قولبة بالحقن وشُكلت على هيئة لُعبة ووُضِعت على خط تجميع.

ربما كان خط التجميع هذا في مصنعٍ خارجَ البلاد في جنوب الصين؛ حيث يُنتَج نحو ثمانين بالمائة من لُعَب العالم.[1] أصبحت اللُّعبة المنتَجة بنحو واسع النطاق شيئًا موجودًا على أرض الواقع، في صحبة آلاف — وربما ملايين — الألعاب البلاستيكية المشابهة. وأول وجه بشري رأته اللُّعبة هو على الأرجح عامل المصنع الذي جمَّع أجزاءها معًا.

ورغم أن هذه الألعاب المنتَجة بأعداد كبيرة ربما تبدو مملة فإن معظمها يسافر إلى جميع أنحاء العالم. تركتْ هذه اللُّعبةُ وجيوشٌ غفيرة من الألعاب المطابقة لها المصنعَ الذي أُنتجت فيه في صندوق شحن، وبدأتْ رحلةً من آلاف الأميال من انبعاث الكربون عبر المحيطات والطرق والسكك الحديدية. وكانت نهاية رحلتها مكان تنزيل بضائع خلف متجر في مركز تسوق؛ حيث فتح موظف محلي الصناديقَ وأخرج محتوياتها. بعد أسابيع من القبوع في مخزن المتجر، وُضعت اللُّعبة في النهاية على أحد الرفوف في انتظار بيعها، ووجهتها الأخيرة اليدان المتلهفتان لأحد الأطفال ومنزلُه.

دعونا نتخيل أن هذا السيناريو الافتراضي مستمر، وأنه حان دور اللُّعبة المنتَجة بالطباعة الثلاثية الأبعاد للتحدث؛ ستقول هذه اللعبة إنها الوحيدة من نوعها، كما أنها لم تُصمَّم في قسم التصميم أو التسويق في أحد المصانع، لكنْ بِناءً على شخصيةٍ بلُعبة فيديو.

تتميز اللُّعبة المطبوعة بنحو ثلاثي الأبعاد بأنها ذات ألوان زاهية، ومثل شخصية لُعبة الفيديو التي ألهمت تصميمها، فإنها تمتلك عباءة مطوية تنسدل بنحو مموج فوق الكتفين والظهر. لم تبدأ حياة اللُّعبة المطبوعة على هيئة مجموعة من الحبيبات البلاستيكية، بل ككومة من المسحوق البلاستيكي. وفي النهاية خرجت اللُّعبة للوجود عندما طلبتها إحدى العميلات عبر موقع إحدى الشركات، وحملت التصميم المراد، وأدخلت رقم بطاقتها الائتمانية.

عندما تلقت شركة الألعاب الطلب، عدل مهندسوها الملف الرقمي المحمَّل وضبطوه ليصبح ملف تصميم قابلًا للطباعة. كان معظم عملية الضبط أوتوماتيكيًّا؛ حيث إن

الشخصية المرادة كانت موجودة بالفعل في هيئة رقمية. وأخيرًا، وافق العميل على ملف التصميم النهائي، وصنَّع محلُّ طباعةٍ صغيرٌ قريبٌ اللُّعبةَ في شكلها النهائي.

عند هذه النقطة من القصة، ستقول اللُّعبة المطبوعة إن أول بشري قابلتْه هو موظف محل الطباعة الذي أخرجها من سرير الطباعة. أزال هذا الرجل الماهر في المجال التقني المسحوق الزائد عنها وصقلها ولمعها حتى أصبحت مثالية الشكل. وفي النهاية، وضع موظف آخَر في محل الطباعة اللُّعبة مكتملة الصنع في صندوق صغير، وأرسله إلى منزل العميل بالشحن السريع.

أي من تلكما اللُّعبتين تمتلك دورة إنتاج أقل إضرارًا بالبيئة؟ من النظرة الأولى، يبدو أن اللُّعبة المطبوعة بنحو ثلاثي الأبعاد أكثر صداقة للبيئة؛ فهي صُنِعت في محل طباعة نظيف محكوم، في دولة متقدمة؛ حيث ظروف العمل جيدة، وتتحقق معايير السلامة، وتُتَّبع قوانين العمل. كما أن شحن صندوق واحد صغير بالشحن السريع يترك عوادم كربونية أقل من الناتجة عن شحن مئات الصناديق الكرتونية الضخمة. لم تَرَ اللُّعبة المطبوعة آلَةَ القولبة بالحقن من الداخل في أي مصنع، أو تسافر حول العالم في شبكة تُصدر عوادمَ الكربون من السفن والشاحنات والطائرات الخاصة بعملية الشحن، كما أن الشركة التي تبيع اللُّعبة هي موقع إلكتروني بسيط لم يحتَجْ إلى التدفئة أو الإضاءة.

للوهلة الأولى، من المغري وصف عملية الطباعة الثلاثية الأبعاد بأنها صديقة البيئة، لكن لا تنسَ حقيقة أن كلتا اللُّعبتين صُنِعتا من بلاستيك غير قابل للتحلل الحيوي. ومقابل كل رطل من المنتج المصنَّع، تستهلك الطابعة الثلاثية الأبعاد أكثر من عشرة أضعاف الكهرباء التي تستهلكها آلة القولبة بالحقن.[2] ورغم سُمعة آلة القولبة بالحقن السيئة، فإنها في الحقيقة آلة اقتصادية ونظيفة جدًّا، وتترك وراءها مخلفات ثانوية قليلة أثناءَ تشكيلها للكُرَيات البلاستيكية. لكن شبكة التوزيع التي يَعتمد عليها هذا الأسلوبُ في التصنيع، والقائمة على عدد كبير من الشحنات الصغيرة لمواقع عديدة، غير فعالة بيئيًّا. كل هذا يضيف لحقيقة أنه إذا حدث توسع كبير في التصنيع بالطباعة الثلاثية الأبعاد لنطاقات عالمية، فلن يكون هناك أي شيء صديق للبيئة بشأنه.

## (٢) تصنيع أقل تلويثًا للبيئة

يكمن الوعد بتصنيع أقل إضرارًا بالبيئة، في الاستغلال الكامل للقدرات التي يتفرد بها التصنيع بالطباعة الثلاثية الأبعاد. وتمتلك تقنيات الطباعة الثلاثية الأبعاد القدرة على

التفوق على نظام التصنيع الواسع النطاق بالطرق التالية: أولًا: يمكن للطابعات ثلاثيات الأبعاد صنع منتجات ذات أشكال محسَّنة سواء بالنسبة إلى استخدامها أو للبيئة. ثانيًا: يُعتبر تخزين ملفات تصميم جاهزة الطباعة — أو مخازن رقمية — طريقة أكثر صداقة للبيئة، بشكل يتفوق على إدارة مستودعات تخزين مكلفة بيئيًّا مليئة بالأجسام المادية. ثالثًا، يومًا ما، يمكن أن يتيح التصنيعُ بالطباعةِ الثلاثية الأبعادِ الموزعُ، للشركاتِ صنع منتجات محلية بالقرب من مكان إقامة عملائها. وأخيرًا، فإن تقنيات الطباعة الثلاثية الأبعاد لديها قدرة غير مستغلة للعمل بمواد طباعة معاد تدويرها أو صديقة للبيئة.

## (٢-١) دراسة أتكينز والتصنيع القليل الانبعاثات الكربونية

في التصنيع، يُعتبَر تقليل الانبعاثات الكربونية أسلوبًا أكثر توفيرًا للطاقة في عمليتَي التصميم والإنتاج. وبالنسبة إلى الباحثين في جامعة نوتنجهام (التي كانت تُعرف باسم لوفبرا)، فإن التصنيع قليل الانبعاثات الكربونية يعني تقليلَ معدل الكربون الناتج عن دورة إنتاج المنتج بالكامل، من التصميم للإنتاج للتجميع للتوزيع حتى التخلصِ منه في النهاية.

يقول ريتشارد هيج، الأستاذ في جامعة نوتنجهام: «إن السمة العامة للمنتجات الحالية هي التبديد في كل النواحي، من التصميم والتصنيع حتى التوزيعِ النهائي للعميل. يُعتبر هذا بنحو أساسي نتيجة للعمليات التقليدية التي تضع قيودًا على التصميم والتصنيع وسلاسل التوريد حاليًّا.»[3] قام ريتشارد وبضعةٌ من زملائه بدراسة متعمقة لمقارنة مخلفات الكربون التي تخلِّفها الطباعة الثلاثية الأبعاد والتصنيع التقليدي، وأطلقوا على الناتج «دراسة جدوى أتكينز»؛ تيمنًا بنظام أتكينز الغذائي قليل الكربوهيدرات.

كان هدف تلك الدراسة تقييم هل كانت الطابعات الثلاثية الأبعاد يمكنها تقليل مخلفات الكربون الناتجة عن التصنيع. قاس باحثو الدراسة الأثر البيئي لكل جانب من جوانب عملية التصنيع: استهلاك الطاقة والمخلفات الثانوية الصناعية وشبكات النقل. ولاستكمال تقييمهم الشامل، حسبوا إن كان يمكن للتصميم الأفضل والشكل المحسَّن للمنتج (وهما ميزتان تنفرد بها منتجات الطباعة الثلاثية الأبعاد) توفير فوائد بيئية لاحقًا في دورة إنتاج المنتج. على سبيل المثال، إن المنتجات المطبوعة المحسَّنة يمكن أن تكون أخف وزنًا أو أفضل أداءً أو أكثر تحملًا.

كانت النتائج متباينة؛ ففي المتوسط، استَهلكت الطابعات الثلاثية الأبعاد التي استَخدمت المواد المعتمدة على البوليمرات — مقارنة بآلات التصنيع التقليدية — ما يفوق عشرة أمثال الكهرباء المستهلكة لصنع جزء بنفس الوزن. وأنتَجت الطابعاتُ الثلاثية الأبعاد الصناعية التي تستخدِم الليزر (أو الحرارة) لتصليد مسحوق البوليمر، مخلَّفاتٍ بلاستيكيةً أكثر بنحو ٦٥ بالمائة عما أنتجته عملية القولبة بالحقن. وبعض الطابعات التي خضعت للتحليل استخدمت نوعًا من البلاستيك يسمَّى البلاستيك المتصلب حراريًّا، وهو غير قابل لإعادة تدويره؛ حيث إنه يفقد خواصه إذا أُعيد تسخينه أو استخدامه. وهذه النتائج تشير إلى أنه على الرغم من دقة عملية الطباعة الثلاثية الأبعاد، فليس كل أنواعها عمليات تصنيع نظيفة بالكامل.

توصلت دراسة أتكينز إلى أن عملية التصنيع القائمة على طباعة منتجات بلاستيكية مطبوعة بها الكثير من الفجوات الداخلية الكبيرة كانت منتِجة للمخلفات بنحو خاص؛ إذ تحتاج الأجسام المجوَّفة للمزيد من المواد الداعمة التي تُنتج الكثيرَ من مخلفات المسحوق البلاستيكي الزائدة. وبينما يمكن إعادةُ تدوير بعض هذه المواد الداعمة الزائدة، فإن باحثي دراسة أتكينز وجدوا أنه في المتوسط، كان ٤٠ بالمائة من المسحوق البلاستيكي الخام الزائد قابلًا لإعادة الاستخدام في مرات طباعة لاحقة، بينما أُلقي ٦٠ بالمائة منه في مدفن النُّفايات كما هو معتاد. الخبر الجيد هو أن مواد الدعم القابلة للذوبان في الماء يزداد معدل استخدامها.

اكتشف باحثو أتكينز أن طباعة البلاستيك لها بعض الفوائد البيئية عند مقارنتها بعملية القولبة بالحقن، وبالتحديد عملية التبريد؛ فبفضل عملية الإنتاج البطيئة، فإن الأجزاء المطبوعة بنحو ثلاثي الأبعاد لا تكون شديدة السخونة معظم الوقت بعد صُنعها. أما في عملية القولبة بالحقن، فعندما تُضغط حبيبات البلاستيك بنحو عنيف داخلَ قالب، تصبح ساخنة للغاية، وتحتاج إلى مواد تبريد. ولفصل البلاستيك من القالب فإن المصانع كثيرًا ما تستخدم موادَّ كيميائية سامة تسمَّى «موانع الالتصاق».

وعلى العكس من طباعة البلاستيك، فإن طباعة المعادن بنحو ثلاثي الأبعاد تتمتع بعدة مميزات عن أساليب تصنيع المعادن التقليدية. وجدت دراسة أتكينز أنه تقريبًا كل بقايا مسحوق المعادن من عملية طباعة واحدة يمكن إعادة استخدامها، وبالعكس فإن عمليات تصنيع المعادن التقليدية (التنعيم أو القولبة أو التشكيل) تُعتبر أكثر إنتاجًا

للمخلفات الضارة بالبيئة. وبعض طرق تصنيع المعادن تَترك وراءَها ٩٠ بالمائة من المعدِن الخام كمخلَّفات ثانوية. على سبيل المثال، يَستهلك إنتاج جزء بديل لطائرة يزن كيلوجرامًا واحدًا خمسة عشر كيلوجرامًا من المعدِن الخام.[4]

وبما أن هدف الدراسة هو تحديد المخلَّفات الكربونية المنتَجة عبر دورة إنتاج المنتَج بالكامل، فقد درس الباحثون الأثر السلبي للطباعة الثلاثية الأبعاد على سلسلة التوريد العالمية. يمكن أن يكونَ التصنيع أقل إضرارًا بالبيئة إذا استَخدمت الشركاتُ المخازنَ الرقْمية وعملية الإنتاج المحلي الفوري؛ وهو نموذج تصنيعٌ غير مركزي يناسب الطباعة الثلاثية الأبعاد بنحو مثالي. توصلت دراسة أتكينز إلى أن «استخدام التصنيع بالإضافة لإنتاج الأجزاء والمكونات المناسبة، وخاصة تلك التي تُنتَج بأعداد قليلة لكنها ذات قيمة عالية، يمكن أن يؤديَ إلى تقليل ملحوظ لتكاليف التخزين ومستويات المخزون.»

إن إحدى أكثر الفوائد البيئية الواعدة (وغير المستكشفة حتى الآن) للتصنيع بالطباعة الثلاثية الأبعاد كانت غير ملحوظة، ألا وهي: تحسين التصميم. تقول دراسة أتكينز إنه باستخدام الطباعة الثلاثية الأبعاد فإن المعايير التقليدية للتصميم من أجل التصنيع «يمكن تجاهلها، ويمكن للمصممين تصميم ما يريدون أو يحتاجون، وليس ما يَقدِر نظامُ التصنيع على إنتاجه». ويمكن للأجزاء البديلة عالية الأداء تقليل المخلفات الكربونية الناتجة عن تصنيعها بطرق عدَّة.

## (٢-٢) الأجزاء المطبوعة العالية الأداء

تُعتبر أجهزة الكمبيوتر أدوات رائعة لحل المشكلات؛ فتصنع التصميمات المنشأة بالكمبيوتر فئة جديدة من المنتجات. ويُعتبر تقليل الوزن طريقة واضحة لتقليل المخلفات الكربونية الناتجة عن تصنيع أي منتج. على سبيل المثال، فإن كل كيلوجرام يَقل من وزن طائرة يؤدي إلى تقليل استهلاكها للوقود بمقدار ٦٠٠ لتر تقريبًا كلَّ عام.[5]

يتخذ تحسين المنتَج العديدَ من الأشكال؛ فيمكن لأي جزء مصمم بعناية أن يدومَ لفترة أطول أو يوفر في الطاقة؛ بسبب أنه مصمَّم ليناسب بيئته. على سبيل المثال، فإن أجزاء المحركات المخصصة المطبوعة بنحو ثلاثي الأبعاد يمكن تصميمها لحمل كَمِّيات أكبر من هواء التبريد أو تحمُّل وزن أكبر.

طريقة أخرى لتحسين المنتَج تتمثل في صنعه بقطَع أقل أو حتى بقطعة واحدة. إحدى القواعد العامة في التصنيع هي أنه كلما زادت القطع في منتج ما، زادت الموارد التي

يحتاج إليها صنعه. وكلما زادت القطع التي يجب تجميعها، طالت سلسلة التوريد وزاد المخزون.

وبفضل عملية التصنيع التي تتفرد بها الطابعات الثلاثية الأبعاد، فإنه يمكنها صنع الأشياء في مرة طباعة واحدة. وإذا استطاع مصنعو المستقبل طباعة أجزاء عُززت تصميماتها ليقل ما يُحتاج إليه لتجميعها، فإن النتيجة ستكون تكلفةً أقل من الناحية البيئية. ستتضمن عملية التصنيع الانسيابية شحن أو ربط أجزاء منفصلة أقل معًا.

وجدت شركة بوينج لتصنيع الطائرات أنه يمكنها طباعة أنبوب هوائي بنحو ثلاثي الأبعاد لطائرة نفاثة مقاتلة كان يصنع فيما مضى من ٢٠ قطعة منفصلة. وبمجرد طباعة الأنبوب كقطعة واحدة، فإنه جُمع كقطعة واحدة بالفعل. ووجدَت بوينج أنه يمكنها جعل مخازنها أكثر فاعلية؛ فتخزين ملفات التصميم وطباعة الأجزاء البديلة حسب الطلب (بدلًا من تخزين وتتبُّع مخزون من الأجزاء المادية) استهلكا مساحة تخزين أقل، وقللا التكاليف الإدارية.



جزء الطائرة المعدِني هذا صُمم بواسطة برنامج كمبيوتر ثم طُبع من المعدِن بنحو ثلاثي الأبعاد. الجسم الخلفي هو النسخة القديمة، أما الأمامي فهو مُحَسَّن ليزن أقل بينما يحافظ على قوته وخواصه الرئيسية الأخرى (هذا الجزء من تصميم شركة الفضاء والدفاع الجوي الأوروبية/إيرباص في المملكة المتحدة، والصورة مهداة من www.paulmcmullin.com).

## (٢-٣) تقليص سلسلة التوريد

العديد من الناس الذين اعتادوا صور المصانع التي تنفث سمومها في الهواء لا يدركون أن ما هو أكثر تدميرًا من ملوثات المصانع على الأرجح هو الاحتراق البطيء لأنواع الوقود الحفري التي تستهلكها سلاسل التوريد. تُنتج عملية نقل المواد والمنتجات حول العالم كمِّيات كبيرة من الملوثات، وتقدِّر متاجر وول مارت أن نحو ٨٠ بالمائة من المخلفات الكربونية التي تخصها تُنتجها شبكتها الضخمة والعالمية من الموردين.

تنقل سلاسل التوريد العالمية المواد الخام للمصانع، ثم لخطوط التجميع، وأخيرًا للمحطة الأخيرة وهي المستهلك. يعتمد كلنا على حركة سلاسل التوريد العالمية، وتقريبًا كل جسم مُنتَج بنحو واسع النطاق نقبله ونشتريه ونستهلكه ثم نتخلص منه — بداية من أي لُعبة بلاستيكية بسيطة حتى الجهاز الطبي الذي يُنقذ حياة البشر في الجراحات — هو نتاجُ سلسلة توريد طويلة وملتوية. يَنتُج عن سلاسل التوريد انبعاثاتٌ كربونية ضخمة؛ بسبب انبعاثات الوقود من الجيوش الصناعية من الشاحنات والطائرات والسفن التي تنقل الأشياء من مكان إلى مكان.

تَستهلك المستودعات التي تحتفظ بالسلع غير المباعة وغير المستخدمة كهرباء للتدفئة والتبريد والإضاءة، واستبدال المخزون الرقمي بالمخزون المادي من شأنه أن يجعل سلسلة التوريد أقل ضررًا بالبيئة؛ فالمخزون المادي لا يحتاج إلى النقل فقط، بل يَستهلك مساحات كبيرة على الرفوف أثناءَ انتظاره للمستهلك. على العكس من ذلك، فإن المخزون الرقمي — أو ملفات التصميم لجزء آلة مطبوع بنحو ثلاثي الأبعاد — رخيص وسهل في التخزين والنقل.

يمكن لتقنيات الطباعة الثلاثية الأبعاد المساعدة في الحد من أضرار عملية التصنيع على البيئة إذا فُعِّلت قدراتها الفريدة، لكن التحدي الظاهر يكمن في نهاية دورة إنتاج المنتَج. فكِّر في المثال الافتراضي للُّعبتين البلاستيكيتين الذي ذكرناه في بداية هذا الفصل؛ فكلتاهما مصنوعتان من البلاستيك الصناعي التقليدي.

إذا تم التخلص من اللُّعبتين، فهل سينتهي بهما الحال في نفس المكان؟ الإجابة المحتملة هي نعم بكل أسًى. تكمن المشكلة في البلاستيك. تستخدم الطابعات الثلاثية الأبعاد في الأساس نفس النوع من البلاستيك التِّجاري الذي تستخدمه آلات القولبة بالحقن. ومثل أخ أصغر يأكل نفس الطعام الذي يأكله إخوته الكبار، بما أن الطابعات

الثلاثية الأبعاد نشأت على أرض المصانع، فإنها احتفظت بشهية لنفس المواد الخام التي تُستخدم في التصنيع الواسع النطاق.

## (٣) الطباعة الثلاثية الأبعاد لمدفن نُفايات أكثر جمالًا

تحصل المواد الخام الغريبة الخاصة بالطباعة الثلاثية الأبعاد على الكثير من الاهتمام الإعلامي؛ على سبيل المثال، الشكولاتة أو الجل الذي يحتوي على خلايا حية. ومواد الطباعة الأخرى مثل المعادن والخزف والزجاج أصبحت تُستخدم في بعض الاستخدامات الصناعية، لكن طبقًا لبيانات السوق التي تتْبع بيع مواد الطباعة، فإن البلاستيك ما زال في القمة.

لذا من المرجح أن تجد بجانب أي طابعة ثلاثية الأبعاد دِلاءً من مسحوق البلاستيك أو بَكرات بحجم غطاء إطار السيارة مغلفة بخيوط بلاستيكية زاهية الألوان. يَشيع كذلك استخدام مسحوق النايلون. ومن المواد الأخرى التي تَشْتهر كمواد طباعة بلاستيكية على هيئة مسحوقٍ البولي بروبلين (هو نفس البلاستيك الذي تُصنع منه عُلَب الزبادي) والبولي إيثلين (الموجود في أكياس القمامة).

تَختبر شركةُ ميكربوت كلَّ طابعة جديدة قبلَ شحنها لمشتريها. عندما زرتُ مبنى الإنتاج القديم الخاص بالشركة في عام ٢٠١٢، في بروكلين بنيويورك، كانت هناك صفوف من بَكرات زاهية اللون من بلاستيك الأكريلونتريل بوتادين ستايرين معلَّقة فوق الطابعات الثلاثية الأبعاد؛ مما أكسب المشهد مظهرًا بهيجًا يُذكر بصندوق جديد من ألوان الشمع من إنتاج شركة شهيرة. ومثل طابعات ميكربوت، فإن معظم الطابعات الثلاثية الأبعاد قليلة الثمن الشهيرة لدى المستهلكين تَستخدم هذا النوع من البلاستيك الموجود في مكعبات الليجو وزوارق الكنو البلاستيكية والحقائب ذات الجسم المقوَّى.

هناك عدة أسباب تجعل البلاستيك يظل أكثر المواد المستخدمة في الطباعة الثلاثية الأبعاد: أولًا: البلاستيك رخيص وسهل الاستخدام. ثانيًا: للبلاستيك تاريخ طويل من النجاح كمادة خام للأجسام المصنَّعة بنحو واسع النطاق، بدءًا من الزجاجات البسيطة حتى أجسام القوارب الباهظة وكثيرة التفاصيل.

تُستخدم أحيانا كلمة «بلاستيكي» بتهكم لوصف شخص أو شيء مصطنع. في الحقيقة، إن البلاستيك حقيقي للغاية، هو حقيقي لدرجة أنه مصدر رئيسي — ومتزايد بنحو كبير — للتلوث على كوكب الأرض. وما أُنتج من البلاستيك في عام ٢٠٠٠ يفوق ما أُنتج في عام ١٩٦٠ بخمس وعشرين مرة.[6]

تتابع الصحفية سوزان فرينكل التحول في مجتمعاتنا من الافتتان المبدئي بالبلاستيك حتى العلاقة الحالية، وهي علاقة اعتمادية بنحو كبير، تسميها سوزان «علاقة حب سامة». عندما طُورت المواد البلاستيكية منذ ١٥٠ عامًا مضت تقريبًا، أُعلن أنها مادة جديدة مُحرِّرة ستحمي الأفيال والسلاحف من الانقراض.[7] بعد الحرب العالمية الثانية، انتشر الاستخدام العام للبلاستيك على نطاق واسع. وطبقًا لمجلس الكيمياء الأمريكي، فإن البلاستيك أصبح في عام ١٩٧٦ المادة الأكثر استخدامًا حول العالم.

معظم المواد البلاستيكية اليوم مصنوعة من وقود حفري، سواء كان الغاز الطبيعي أو النفط. وأحد الأسباب التي تجعل صنع البلاستيك قليل التكلفة للغاية هو أنه مصنوع من مخلفات ثانوية تَنتج عند استخلاص الوقود الحفري من الطبيعة.[8] ولإظهار كيف أن في إمكان بضعة جزيئات تغيير خواص جسم ما بنحو كامل؛ يحتوي البلاستيك على كَمِّية كبيرة من الهيدروجين والكربون، وهما العنصران اللذان يميزان الأجسام الحية.

إن قدرة أي جسم بلاستيكي على تحمُّل التعامل الخشن والظروف الصعبة هي ما يجعل البلاستيك مفيدًا للغاية، لكن نفس التماسك والتحمل يجعل الأجسام البلاستيكية كذلك أشياءَ ضارة بالبيئة؛ إذ تتحول إلى كَمِّيات ضخمة من المخلَّفات التي ترفض أن تتحلل حيويًّا مهما طالت مدةُ أو مسافةُ سفَرها. تسافر الأجسام البلاستيكية من صفيحة القُمامة حتى مدفن النُّفايات أو ينتهي بها الحال في المحيط.

في عام ١٩٩٧، وخلال رحلة بحرية لجزء بعيد في شمال المحيط الهادئ، ولصدمة ورعب تشارلز مور، وَجد قاربه محاطًا بشبكة كبيرة طافية من «النُّثار» البلاستيكي المهمَل. أطلق تشارلز اسمًا على هذه القطع البلاستيكية الكثيرة، والتي كانت تغطي مساحةً تقدَّر بمساحة أقلَّ من مساحة ولاية تكساس بقدر بسيط، وهو «رُقعة النُّفايات العظمَى في المحيط الهادئ».

بعد هذا التحذير، ألَّف تشارلز مور كتابًا عن تجرِبته بعنوان «المحيط البلاستيكي».[9] وكرَّس حياته للبدء في جمع وتحليل البقايا البلاستيكية التي تملأ مياه المحيطات. وعلى مدار السنوات، سافر مور وفريقُه بنحو منتظم إلى رقعة النُّفايات العظمى لفرز وفهرسة أطنان من المخلَّفات البلاستيكية الطافية، التي معظمها كان على هيئة جسيمات متناهية الصغر.

إن معظم الأجسام البلاستيكية التي ينتهي بها الحال في المحيطات لا تتحلل حيويًّا، وستبقى للأبد في المياه. بمرور الوقت، تكسر حركة مياه المحيط النُّفايات البلاستيكية

الطافية لقطع صغيرة — وهي ما وصفه تشارلز مور بالنُّثار — لا تُرى في الصور التي تلتقطها الأقمار الصناعية لكنها مميتة للنظام البيئي البحري. تستمر جُزر القُمامة البلاستيكية الطافية في محيطاتنا في النمو كلَّ عام؛ مما يضر بالحياة البحرية، ويتسبب في اختناق الطيور وحيوانات الفُقْمة، ويسرِّب منتجات ثانوية سامة للنظام البيئي.

يقول مور إن كَمِّية النُّثار البلاستيكي الذي تلتقطه شِباك صيد السمك يزيد عن حجم العوالق الحيوانية — القاعدة الغذائية للمحيط — بمعدل ستة إلى واحد. بالإضافة إلى هذه القطع البلاستيكية المتناهية الصغر، تَسحب الشباك أيضًا أجسامًا بلاستيكية أَلِفنا استخدامها في حياتنا اليومية؛ مثل القَدَّاحات غير القابلة لإعادة الملء، وشِباك صيد السمك البلاستيكية، والمقابض البلاستيكية، وألعاب الأطفال، وبالطبع، الزجاجات البلاستيكية.

اليوم، يتضاءل حجم إنتاج الأجزاء البلاستيكية بالطباعة الثلاثية الأبعاد مقارنة بالموجة العاتية للسلع البلاستيكية المنتَجة في المصانع على نطاق واسع. وإذا وُضعت النُّفايات البلاستيكية من الطباعة الثلاثية الأبعاد بجانب رُقعة النُّفايات العظمى في المحيط الهادئ، فإن حجمها سيكون صغيرًا جدًّا كحجم فَردة حِذاء طفل مقارنة بملعب كرة قدم. مع ذلك، ومثل أي جسم بلاستيكي آخر، سواء كان مصنوعًا بنحو مخصص أو منتجًا بأعداد كبيرة، فإن معظم المنتجات المطبوعة بنحو ثلاثي الأبعاد التي تصل إلى نهاية دورة إنتاجها سيُتخلص منها في صفيحة القُمامة.

يشير رائد الطباعة الثلاثية الأبعاد، وصاحب الرؤى، الجريء، جوريس بيلز، إلى أنه إذا استمررنا في استهلاك والتخلص من المنتَجات بالمعدل العالمي الحالي للاستهلاك، فسنختنق حتى الموت وسط نُفاياتنا. في إحدى المقالات على مدونة بعنوان «الطباعة الثلاثية الأبعاد في مقابل الإنتاج الواسع النطاق: مدفن نُفايات أكثر جمالًا»، كتب بيلز قائلًا: «أخشى أن يقودَنا الإنتاج الواسع النطاق في النهاية إلى الفَناء الشامل ... أومِن بالفعل أننا متجهون للفناء ... ومثل سكان جزيرة الفصح، نحن في طريقنا كذلك لقطع آخر شجرة متبقية.»[10]

البلاستيك مادة مدمرة للبيئة، لكنها كذلك مادة رائعة مُحرِّرة، مكَّنت الجميع تقريبًا من امتلاك منتجات منزلية كانت حِكرًا على الأغنياء فقط. الأجسام البلاستيكية موجودة في جميع جوانب حياتنا تقريبًا، من الألعاب البلاستيكية البسيطة حتى الخراطيم البلاستيكية خفيفة الوزن عظيمة الأثر في إنقاذ حياة الناس التي كانت تُستخدم في نقل الدم.

تُعتبر قطع غيار السيارات البلاستيكية أخفَّ وزنًا من مثيلاتها المعدِنية في المحركات وأجزاء السيارة الداخلية، وهذا التوفير في الوزن له فوائده البيئية. ينقذ التغليف بالبلاستيك حياة الناس بحفظ الطعام، كما أن البلاستيك يخلق وظائف؛ فصناعة البلاستيك تُعتبر من أكثر الصناعات التي تُوفِّر وظائف في الولايات المتحدة. كما أن صناعة التغليف، التي ترتبط ارتباطًا شديدًا بصناعة البلاستيك، تُعتبر أكبر من ذلك؛ إذ تأتي صناعة التغليف في المرتبة الثالثة على مستوى العالم بعد صناعتَيِ الغذاء والطاقة.

بغضِّ النظر عن النتيجة، فإن اقتصادنا يقوم على السلع البلاستيكية، وبإعطاء الناس العاديين القدرة على صنع الأشياء من البلاستيك في المنزل، فإن الطباعة الثلاثية الأبعاد تفتح قناة جديدة للتصنيع بالبلاستيك. ولكي تصبح تقنيات الطباعة الثلاثية الأبعاد وسيلة تصنيع أقل إضرارًا بالبيئة، تحتاج إلى استخدام مواد خام جديدة صديقة للبيئة.

## (٣-١) الطباعة باستخدام أوعية الحليب المعاد تدويرها والتراب

لمعرفة المزيد عن المواد الخام الصديقة للبيئة، تحدثتُ مع مارك جانتر، أستاذ الهندسة في جامعة واشنطن بسياتل. قال مارك إن «معظم مواد الطباعة في السوق في الواقع ليست صديقة لكوكب الأرض لدرجة كبيرة.» يدير مارك وصديقه الأستاذ الجامعي دوين ستورتي معمل سولهايم، وهو مركز للطباعة الثلاثية الأبعاد الثورية في جامعة واشنطن. منذ عدة سنوات مضت، ضحَّى مارك ودوين بمرتب شهر لشراء طابعة ثلاثية الأبعاد لمعملهما، وكانت الأولى من نوعها في حرم الجامعة، ولم يندما على هذا القرار منذ ذلك الحين.

أحد أكبر جوانب البحث في هذا المعمل هو الطباعة الثلاثية الأبعاد لمنتجات قابلة للتحلل الحيوي، ويتضمن هذا اختبار وتطوير موادَّ مُعادٍ تدويرُها وصديقةٍ للبيئة. وحسبما يقول مارك فإن الطلاب في معمل سولهايم يطبعون بنحو ثلاثي الأبعاد «كل شيء من السكَّر إلى الخشب إلى أصداف المحار». طبع أحد الطلاب على نحو ثلاثي الأبعاد مزيجًا تجريبيًّا يتضمن إضافة الدم كمادة لاصقة بسبب قدرته الجيدة على التخثر.

يفسر مارك ذلك قائلًا إن أي طابعة ثلاثية الأبعاد يمكنها صنع «أي شيء تقريبًا يمكن تحويله إلى مسحوق، بحيث تمتلك جسيماته حجمًا مناسبًا، وأعني بقولي أي شيء.» السر هو طحن المسحوق ليكون بالنعومة والتركيب المناسبَيْن اللذيْنِ يسمحان بنثره وبسطه

على هيئة طبقات بنحافة الورق. وبمجرد تحويل أي مادة إلى مسحوق، يجب إيجاد مادة لاصقة مناسبة. يُخلط هذا المسحوق اللاصق بمسحوق المادة، ويوضع الخليط في سرير الطباعة، ويُفرَد على هيئة طبقات بنحافة الورق. ثم يُخرج رأس الطباعة بعد ذلك مادة مذيبة لتفعيل قدرة المادة اللاصقة على الإمساك بذرات المسحوق معًا ليشكل الطبقات.



أجسام مطبوعة من الطين الناضج (الصورة مهداة من مارك جانتر ودوين ستورتي من معمل سولهايم في جامعة واشنطن).

احتلت إحدى أجرأ تجارِب العمل في مجال الطباعة الصديقة للبيئة المركزَ الثاني في سباق القوارب السنوي المحلي في سياتل، وكانت قاربًا مطبوعًا بنحو ثلاثي الأبعاد من أوعية الحليب المعاد تدويرها. صَممت المنظمةُ الطلابية التابعة للمعمل، والتي تُدعى «نادي جامعة واشنطن لُصنعي الأجسام المفتوحة» وطَبعتْ قاربًا شاركتْ به في «سباق كراتين الحليب» وهو سباق قوارب شهير يُعتبر جزءًا من مهرجان سي فير السنوي في سياتل. يتسم السباق بقواعد صارمة؛ حيث يُسمح فيه فقط باستخدام أنواع الكراتين التالية للطفو: أوعية سعتها نصف جالون أو جالون من البلاستيك أو الورق المقوَّى التي تُستخدم لحفظ الحليب أو العصير.

بدأ فريق المنظمة الطلابية العمل على صنع القارب قبل بدء السباق بأسابيع في أحد صناديق القُمامة؛ حيث بحثوا فيه، ورجعوا منه إلى المعمل بحوالي ٤٠ رطلًا من الأوعية البلاستيكية. طحن الطلاب الأوعية البلاستيكية لمسحوق ناعم، ثم زودوا قاطع بلازما بأبعاد أربع في ثماني أقدام برأس بَثْق منزلي الصنع. ولتشغيل آلة البَثْق البلاستيكية هذه الخاصة بالطابعة، انتزع الطالب ماثيو روج محركَ مِمْسحة الزجاج الأمامي من سيارته السوبارو. وعلى مدار شهرين، وبعد العديد من تجارِب الأداء الفاشلة، اكتشف الطلاب أن مسحوق أوعية الحليب به معرَّض للانكماش في الحجم بنسبة اثنين بالمائة عند الطباعة به. وحسبما يقول مارك، وبعد بعض التعديل في التصميم، استغرق فريق المنظمة الطلابية يومين كاملين في طباعة قارب يمكنه تحمُّل وزن ١٥٠ رطلًا، والسير في المياه «كقارب كنو-كاياك».

يقول مارك إنه عندما ذهب الفريق بالقارب المطبوع إلى السباق، «تطلَّب الأمر بعض التوضيح.» وبعد بعض النقاش مع اللجنة المشرفة على السباق، تمت الموافقة على مشاركة القارب في سباقات مجموعة سن الأربعة عشر عامًا وما فوقها. وبعد الحصول على إذن في اللحظات الأخيرة من حُكام السباق، قبل خمس دقائق من بدء السباق، أنزل الطالبان مات روج وآدم كومنز القارب في المياه، وقاده مات ليفوز بالمركز الثاني في مجموعة ما فوق سن الرابعة عشرة.

كان القارب المطبوع بنحو ثلاثي الأبعاد مشروعًا مثيرًا من الناحية البيئية لأنه أثبت أن أوعية الحليب المعاد تدويرها يمكن إعادة استخدامها وطباعتها بنحو ثلاثي الأبعاد لإنتاج أشياءَ أساسية وقابلة للاستخدام. تُصنع الأوعية البلاستيكية المستخدمة في حفظ الحليب من البولي إثيلين عالي الكثافة، وهو نوع من البلاستيك الحراري المشتق من النفط، قابل لإعادة الاستخدام، ويُستخدم على نطاق واسع. على الرغم من ذلك، فلا يُعاد تدوير معظم البلاستيك، وطبقًا لوكالة حماية البيئة الأمريكية، فإن معدلات إعادة التدوير بين جميع أنواع البلاستيك تبلغ حوالي ١٣ بالمائة في المتوسط، وهو أقل بكثير من معدلات تدوير القُمامة من الزجاج والصلب والألومنيوم والورق.[11]

ربما يوفر البلاستيك النباتي الأصل بديلًا أقل ضررًا بالبيئة للبلاستيك المشتق من النفط. عندما سألتُ مارك عن موادِّ الطباعة البلاستيكية المتاحة الأقل ضررًا بالبيئة، وصف نوعًا يسمَّى متعدد حَمض اللاكتيك، الذي يرى أنه «مادة عظيمة للطباعة الثلاثية الأبعاد بطريقة النمذجة بالترسيب المنصهر، كما أن البلاستيك المشتق من الصويا اختيار جيد كذلك.» يُعتبر متعدد حَمض اللاكتيك نوعًا من البلاستيك الحراري المشتق من الذرة



قارب بلاستيكي مطبوع بنحو ثلاثي الأبعاد عن طريق طحن أوعية حليب مستخدمة (الصورة مهداة من براندون بومان من نادي جامعة واشنطن لُصنعي الأجسام المفتوحة، ومارك جانتر ودوين ستورتي من معمل سولهايم بجامعة واشنطن).

شائع الاستخدام في الطباعة الثلاثية الأبعاد، وهو من أنواع البلاستيك الحراري القابلة للذوبان في الماء. ويمكن استخدامه في مواد الدعم، وبما أنه قابل للذوبان في الماء، فيمكن شطفه بالماء — وليس المذيبات — وإعادة استخدامه.

هناك طريقة أخرى جيدة لجعل طباعة البلاستيك أكثر صداقة للبيئة وهي إعادة تدوير وبيع خيوط بلاستيك أكريلونتريل بوتادين ستايرين المتخلفة عن الطباعة. يقول مارك: «أتمنى أن يبدأ شخص بيع خيوط البلاستيك المعاد تدويرها قريبًا. يُجري معملنا ومعامل أخرى تجارِب على هذه الفكرة. ماذا لو حوَّل كلُّ منزل مخلفاته البلاستيكية إلى خيوط بلاستيكية يمكن استخدامها في الطباعة الثلاثية الأبعاد؟ إنه أمرٌ رائع!»

ربما ستصبح أول دفعة من خيوط البلاستيك المعاد تدويرها متاحة للاستخدام التِّجاري عما قريب. جمع تايلر ماكناني، الطالب في كلية فيرمونت التقنية، مبلغ عشرة آلاف

دولار على موقع كيك ستارتر لصنع آلة تطحن وتعيد صهر الأجسام البلاستيكية المهمَلة المطبوعة بنحو ثلاثي الأبعاد لتحويلها إلى خيوط بلاستيك للطباعة. أطلق تايلر اسم «فيلابوت» على آلة إعادة التدوير هذه ووصفها عبر موقعه بأنها «سهلة الاستخدام لكنها ... صديقة للبيئة كذلك، وهي ستساعد في اكتساب الطباعة الثلاثية الأبعاد لقوة الاستدامة الحقيقية.»

إن إعادة تدوير البلاستيك بداية جيدة، لكن هناك حاجة للمزيد. يقول مارك: «لجعل الطباعة الثلاثية الأبعاد تقنية يمكن أن تساهم في تطوير الحياة، نحتاج إلى طرق لطباعة المنتجات من المخلفات؛ مثل مخلفات الطعام والزجاج المعاد تدويره والرمل وحتى التراب.» يخطط مارك للقيام بالمزيد من البحوث لاستكشاف هل كان من الممكن استخدام مسحوق المواد الغذائية كمادة خام مستدامة للطباعة الثلاثية الأبعاد. يقول مارك: «دقيق الأرز متاح في جميع أنحاء العالم تقريبًا، ويؤدي بنحو جيد جدًّا في الطباعة. كما أن المنتجات الثانوية للطعام مثل قشرة الذرة أو قش القمح تكلفتها قليلة للغاية.»

أنهى مارك كلامه قائلًا: «تبدو الطباعة الثلاثية الأبعاد الصديقة للبيئة اتجاهًا رائعًا لنسلكه، وربما تبدو إعادة تحويل المخلفات إلى أجسام قابلة للاستخدام شيئًا خياليًّا، لكنها فكرة تستحق النظر فيها بتعمق لنرى إن كان يمكننا تحقيقها.»

### (٣-٢) من «التقادم المخطط» إلى «المخلفات الوافرة»

أحد الأخطار البيئية للطباعة الثلاثية الأبعاد لا يتعلق بعملية التصنيع أو المواد الخام؛ بل بأسلوب التفكير الجديد. تتيح الطباعة الثلاثية الأبعاد للناس القدرةَ على تصميم وصنع أي جسم مادي يمكن أن يحلموا به. لكن كما يقول المثل القديم: «لا شيء في الحياة بالمجان»؛ فإعطاء الناس أدوات إنتاج يخلق كذلك الإغراء لتبديد المواد الخام وإنتاج الكثير من المخلفات.

عندما ظهرت طابعات الليزر القليلة التكلفة منذ بضعة عقود، لم تؤدِّ مباشرة إلى ظهور المكتب الذي لا يستعمل الورق، بل شجعت تقنيات الطباعة المتاحة على نطاق واسع والرخيصة، الناسَ على الطباعة بنحو مبذِّر وعشوائي. بالمثل، فإنه إذا وُجدت الطابعات الثلاثية الأبعاد في كل مكان، فربما تقود إلى إنتاج المزيد من المخلَّفات، وتسهِّل للناس صنع أشياءَ بنحو تبذيري من دون إدراك النتائج السلبية لأفعالهم.

يُنصح المهندسون والخياطات وحتى الجراحين بالقياس مرتين والقطع مرة واحدة. عندما يكون الإنتاج مكلفًا أو المخاطر كثيرة، فإن المصمم أو المهندس سيقيس ويخطط مرة تلو الأخرى للتأكد من أن الإنتاج المادي يسير كما هو مخطط له. إن برامج التصميم سهلة الاستخدام، ووجود طابعة ثلاثية الأبعاد قريبة، سيسهلان من عدم الانتباه لهذا الأسلوب الصديق للبيئة. لسوء الحظ، فإن الطباعة الثلاثية الأبعاد تولِّد روحًا من «التصنيع غير العقلاني» في بعض الناس الذين لديهم استعداد للقيام بهذا.

رأيت آثار التصنيع غير العقلاني بنحو مباشر. ذهبت ذات صباح لمعملي واكتشفت ٢٤ أو أكثر من الأجسام البلاستيكية مشوهة الشكل من نفس الشكل تقبع بنحو عشوائي على الطاولة التي تقع بجانب طابعة المعمل الثلاثية الأبعاد. اتضح أن صانع هذه النُّفايات البلاستيكية التي تكفي لملء صفيحة قُمامة كان أحد طلابي الذي قضى الليلَ في المعمل في طباعة نماذجَ أوليةٍ مليئة بالعيوب واحدًا تلو الأخر بنحو محموم؛ من أجل واجب دراسي كُلف به، ومِثل كاتب محبَط يمزِّق الأوراق واحدة تلو الأخرى، طبع هذا الطالب تصميمًا ثم عدَّل أبعاده بنحو بسيط في ملف التصميم وطبعه مرة أخرى؛ على أمل أن يخرج النموذج الجديد أفضل من سابقه.

ينقح مهندسو البرمجيات الأكوادَ الأولية بتجميعها واختبارها في هيئة رقمية، لكن تجميع الأكواد المعيبة وإعادة تجميعها أكثر من مرة لا يبدد موادَّ خام ثمينة، بل يبدد وقتَ وصبرَ المطور، لكنه لا يملأ صفيحة القُمامة بأجسام بلاستيكية مشوهة الشكل.

والآن، وقد سرَّعت الطابعات الثلاثية الأبعاد من عملية صناعة النماذج الأولية، فإن عملية التنقيح المادي الضارة بالبيئة أصبحت خيارًا واقعيًّا، على الأقل للأجسام الصغيرة. عندما يطبع الناس أفكار تصميم أولية بنحو ثلاثي الأبعاد بدلًا من اختبارها أولًا على مُحاكٍ إلكتروني أو القيام بعمليات القياس مرتين أو ثلاثًا، فهم يتبعون ما قد يصفه البعض بأنه عقلية تنقيح بدلًا من عقلية تصميم أثناء عملية تصميم المنتج. وحتى وقت قريب، كانت عقلية التنقيح في العالم المادي مكلفة للمال ومضيعة للوقت. تسهل الطابعات الثلاثية الأبعاد للناس اختبار ملفات التصميم خاصتهم عن طريق طباعتها، وهو شيء لم يكونوا ليحلموا به إذا كان يجب عليهم صنع هذه الأشياء بنحتها أو استخدام أساليب التصنيع الواسع النطاق.

في إشارة لما هو مقبل، إذا زرت أي متجر أو معمل يتيح للطلاب أو المهندسين وصولًا غير محدود لطابعة ثلاثية الأبعاد، فإن أي سطح مستوٍ سيمتلئ بالتجارِب الفاشلة



تجارِب طباعة فاشلة. هل سننتقل للتصميم بالتجرِبة والخطأ؟

للطباعة الثلاثية الأبعاد. على الرغم من ذلك، هناك جانب إيجابي بعيد الأمد لعملية التنقيح المادي في المواقف التي لا يمكن فيها بنحو مناسب اختبار التصميمات المعقدة باستخدام برنامج محاكاة؛ فكلما أصبحت التصميمات أكثر تعقيدًا، استحال تقريبًا — حتى بالنسبة إلى مهندس محترف — فحصها على شاشة كمبيوتر، والتنبؤ بما إذا كانت ستكون مجدِيَة على أرض الواقع. صحيح أن برامج النمذجة الجيدة باستخدام الكمبيوتر يمكنها أن تساعد في محاكاة الخواص المادية لأي جسم مصمم، لكن ليس هناك حتى الآن أي بديل لفحص الجسم المادي.

يمكن للنماذج الأولية المطبوعة بنحو ثلاثي الأبعاد سريعة الصنع أن تساعد في تقليل كَمية المخلفات على خطوط التجميع في التصنيع الواسع النطاق. فبصنع نموذج مادي من ملف تصميم رقمي، فإن المهندسين والمصممين تُتاح لهم فرصة أخيرة للتأكد من أن خططهم للمنتج ستفلح. وهكذا يمكن تصحيح مشكلات التصميم والعيوب الجمالية قبل أن تبدأ آلات التصنيع الواسع النطاق العمل لتبدد الطاقة الثمينة وتُخرج آلاف النسخ التي بها أخطاء.

تُعد تقنيات الطباعة الثلاثية الأبعاد أملًا للحفاظ على البيئة وخطرًا عليها على حد سواء، فسيكون من المثير للإحباط بعد ٢٠ عامًا من الآن أن يذهب تشارلز مور لاستخراج لعب بلاستيكية مطبوعة بنحو ثلاثي الأبعاد وحلقات ستائر حمام مخصصة، وغيرها من الحليِّ الصغيرة التافهة من رقعة النُّفايات العظمى في المحيط الهادئ. في عالم مثالي، كل التصنيع سيكون نظيفًا ومبتكرًا مثل عملية التصليد الشمسي في الصحراء، ولن تصبح الطباعة الثلاثية الأبعاد تقنية صديقة بالبيئة بطبيعتها إلا إذا سعَيْنا بنحو فعال لجعلها كذلك، فإذا أمكننا استغلال القدرات الفريدة للطباعة الثلاثية الأبعاد وصنع مواد طباعة أكثر صداقة للبيئة، فسنحصد الفوائد البيئية على هيئة سلاسل توريد أقصر وجيل جديد من المنتجات المحسَّنة.

الفصل الثاني عشر

# الملكية والأمان وجبهات قانونية جديدة

يمكن أن يصبحَ القانون حماية لشخص بينما يُمثِّل عائقًا أمام شخص آخر؛ وخاصة بالنسبة للقوانين التي تحاول تناول موضوعات فلسفية مثل الأمان أو الملكية. واجهتُ هذا أثناءَ تقديم دورة صيفية لطلاب المرحلة الثانوية المهتمين بالتصميم والهندسة. كانت الدورة التي وصلتْ مدتُها لأسبوع تقدِّم مبادئ تصميم المنتجات باستخدام برامج تصميم بسيطة والطابعة الثلاثية الأبعاد الخاصة بمعملنا. كانت الخطة هي أن يصمم كل طالب منتجًا، ويسميه ويصف قيمته التِّجارية، وأخيرًا يعرضه للبيع على موقع شركة شيبوايز.

في نهاية الأسبوع، صنع الطلاب تنوعًا غنيًّا من تصميمات المنتجات. وفي آخر أيام الدورة، عرضتُ الخطوة الأخيرة وهي أن يُحمِّل كل طالب ملف التصميم الخاص بمنتجه على موقع شيبوايز حيث سيُباع عبر الإنترنت.

أحد الطلاب، الذي كان في بداية الدورة يُري صديقه بابتهاج كيف يكسر حماية هاتفه الآي فون لتنزيل موسيقى مجانية، رفع يده في سخط قائلًا: «لكني إذا حمَّلت ملف التصميم خاصتي على الإنترنت، فما الذي يمنع أن يُنزله شخصٌ ما ويصنع عدة نسخ مجانية من دون دفع ثمنها؟»

طالبةٌ أخرى قالت إنه ربما لا يجب عليها تحميل تصميم منتجها على الإنترنت في نهاية الأمر؛ فهي لم تكن متأكدة إن كان حامل هاتف الآي فون المزخرف المصمم لِمقبض الدراجة آمنًا بما يكفي لمنع هاتف شخص ما من الانزلاق والتحطم في الشارع، بينما قال طالب آخر إنه لا يهتم كثيرًا ما إذا استخدم شخص الملفات التي صممها لأُحجية مطبوعة بنحو ثلاثي الأبعاد. ما يُثير ضيقه فعلًا هو أن يأخذ شخصٌ ما تصميمه ثم ينسب الفضل في تصميمه لنفسه.

استغرقت هذه المجموعة من طلاب المرحلة الثانوية بضع دقائق فقط للتعبير عن التحديات القانونية التي تكمن في المستقبل فيما يتعلق بالطباعة الثلاثية الأبعاد. ومِثل صناعة الكمبيوتر منذ عقودٍ خلتْ، فإن السوق المحيطة بالطابعات الثلاثية الأبعاد والخدمات المتعلقة بها ما زالت في مَهدها. إنها جبهة مفتوحة ومساحة جديدة غير مأهولة نسبيًّا ما زال نشاطها التِّجاري متواضعًا للغاية ليجذب أنظار صناع القوانين ومقيمي الدعاوَى القضائية للشركات والمجرمين.

يصعب التنبؤ بالأثر السلبي لهذه التقنيات الناشئة التي ستُحدث تغييرًا شاملًا. انظر للكمبيوتر الشخصي خاصتك الذي يقبع ساكنًا بكل براءة فوق مكتبك. خلال ما يقرب من العَقد، هزت الحوسبة نظامنا القانوني حتى قواعده.

أصبحت ضريبة المبيعات المحلية أو ضريبة القيمة المضافة — التي كانت أمرًا مباشرًا وبسيطًا فيما مضى — مسألة محاسبية معقدة للتعاملات التِّجارية التي تَجري عبر الإنترنت. واتَّخذت جريمة الملاحقة أو التعقب معنًى آخر تمامًا على الإنترنت. تلتف الشركات حول قوانين خصوصية المستهلك لتتتبع من دون رادعٍ تاريخَ بحثِ وتصفحِ المستهلك وعاداته الشرائية عبر الإنترنت. ولم تعُد الجريمة المنظَّمة ظاهرةً محلية مركزية؛ حيث إن مجرمي الإنترنت يرتكبون جرائم التحايل والتجسس من أماكن بعيدة وخفية.

عندما كانت أجهزة الكمبيوتر أدوات صناعية مكلفة تقوم بعملها في غرف خلفية في مراكز البيانات، لم تُثر الكثير من التحديات القانونية الجديدة، لكن عندما وصلت لقدْر كبير من عامة الناس، اكتشف الناس والشركات بسرعة أن القوانين واللوائح الموجودة بالفعل غير ملائمة بنحو مثير للأسى، وأن التعريفات القانونية الأساسية للملكية والمكان والهيئة يتحتم إعادة تعريفها.

إن الطباعة الثلاثية الأبعاد، مثل أي صناعة تحدث فيها قفزات تقنية سريعة للأمام، ستواجه أيضًا تحديات قانونية جديدة وأشكالًا غير مألوفة من أمان المستخدم والأنشطة الإجرامية. والقوانين تتغير ببطء، لكن التكنولوجيا لا تنتظر أحدًا.

## (١) طباعة الأسلحة والعقاقير والمنتجات المزورة

كان تزوير العملة فيما مضى يُعتبر مهنةً تتطلب المهارة. في نشرة خدمة عامة صدرت مؤخرًا، أشارت وكالة الخدمة السرية الأمريكية إلى أن مزوِّري اليوم يُعتبرون فصيلة جديدة

تمامًا. يحتاج المزوِّرون اليوم فقط «لمعرفة أساسيات استخدام الكمبيوتر واكتساب مهارات عن طريق التجرِبة والخطأ وتعليم حكومي».

قبل عام ١٩٩٥، كان أقل من واحد بالمائة من النقود المزورة مصنوعًا باستخدام أجهزة الكمبيوتر وطابعات الليزر. بعد خمس سنوات فقط، وبحلول عام ٢٠٠٠، كان حوالي نصف النقود المزورة مصممة عبر الإنترنت ومطبوعة بطابعة ألوان متطورة.[1] حررت برامج التصميم باستخدام الكمبيوتر وطابعات الليزر الملونة وتقنية الخراطيش عملية تزوير المال وأتاحتها للجميع؛ إذ كانت تقنية طباعة الأوفست التقليدية القديمة تتطلب مزورًا ماهرًا لديه سنوات من الخبرة في هذه العملية.

المال المزوَّر يسبب ضررًا اقتصاديًّا، لكن البضائع المزيفة والأسلحة غير المرخصة المطبوعة بنحو ثلاثي الأبعاد يمكنها إحداث أذًى جسدي. تمت إحدى أوليات المناقشات الأخلاقية التي حدثت في مجتمع الطباعة الثلاثية الأبعاد في عام ٢٠١٢ على موقع مشاركة ملفات يسمَّى Thingiverse.com.

حمَّل أحد مستخدمي الموقع ملف تصميم لجزء من بندقية مطبوع بنحو ثلاثي الأبعاد يمكن صنعه من البلاستيك بطابعة منزلية ثلاثية الأبعاد. أتاح الملف للناس تخطي جزء مهم من عملية المراقبة متعلق بالحصول على رخصة لحمل سلاح. كان هذا الجزء بالتحديد هو القطعة الوحيدة من نموذج البندقية هذه التي تتطلب أن يخضع مستخدموها لتحرٍّ عنهم. بمعنًى آخر، وبطباعة جزء البندقية هذا بنحو ثلاثي الأبعاد، يمكن لأي شخص تجنُّب قوانين مراقبة الأسلحة.

لم يتدخل القانون فيما طُرح على الموقع؛ وكان رد فعل مجتمع الطباعة الثلاثية الأبعاد هو التفكير في الموضوع. وفي النهاية، وبعد الكثير من النقاشات، اتُّخذ قرار بأن يُطلَب من مصمم جزء البندقية إزالة الملف من الموقع.

بعد مرور بضعة أشهر على الواقعة الأولى، صنع صانع أسلحة عبر الإنترنت باسم «هافبلو» سلاحًا ناريًّا عاملًا مصنوعًا بنحو جزئي من أجزاء بلاستيكية مطبوعة بنحو ثلاثي الأبعاد. كان السلاح من عيار ٢٢ ومصنوعًا من مزيج من أجزاء مطبوعة بنحو ثلاثي الأبعاد وأخرى مشتراة. كان الجسد الأساسي للسلاح الناري من البلاستيك لكن حجرة إطلاق الرصاص كانت من المعدِن.

أعلن هافبلو عبر الإنترنت أن الأجزاء المطبوعة المكوِّنة للسلاح الناري كانت قوية بما يكفي لدرجة أنه أطلق منه ٢٠٠ رصاصة. ولم تكن هناك حاجة لأي مُعَدات خاصة.



بندقية عيار ٢٢ مُصنَّعة بنحو جزئي من بلاستيك مطبوع بنحو ثلاثي الأبعاد (الصورة مهداة من مايكل جاسليك).

كانت أجزاء السلاح مطبوعة بآلة قديمة نسبيًّا من إنتاج شركة استراتاسيس باستخدام راتينج عادي للأغراض التِّجارية. قدَّر صانع السلاح أن تكلفة شراء الراتينج لطباعة أجزاء السلاح بلغت حوالي ٣٠ دولارًا.[2]

كان من الممكن دائمًا صنع سلاحك الخاص لكن الطابعات الثلاثية الأبعاد تُعتبر الأداة المثالية للمجرمين من متقني التكنولوجيا. تصنع طابعة ثلاثية الأبعاد أجسامًا بأشكال كانت غير ممكنة الصنع من قبلُ باليد أو الآلات، على سبيل المثال، سلاح على هيئة حذاء أو فرشاة شعر. وتتميز الطابعات الثلاثية الأبعاد بصغر الحجم وإمكانية حملها، كما يمكنها صنع جسم مخصص تلو الآخر بطريقة سرية من دون الاحتياج إلى مصانع أو تنسيق أو أي كشف غير ضروري عن المنتج.

أصبح التزوير والجرائم — مثل صناعات التصميم والتصنيع السائدة — أكثر فاعلية وابتكارًا بواسطة التقنيات الجديدة. وتجارة الأسلحة غير القانونية تجارة كبرى؛ وبالمثل الاتجار في المخدرات.

### (١-١) العقاقير المصممة

ربما ستخبرون أحفادكم يومًا ما عن أيام الماضي، عندما كان يجب أن يصف الطبيب أدوية معينة للناس حتى يمكنَهم الحصول عليها، أو كان يجب الحصول على إذن أمني لشراء مواد كيميائية خطرة. سيرد من سيستمع إليك باستعجاب وعيون متسعة: «حقًّا؟»

ستهز رأسك موافقًا: «نعم، كانت هذه هي الطريقة التي تسير بها الأمور قبل ظهور مصانع الكيمياويات التي تتيح لك صنع الأشياء بنفسك.»

في أحد المقالات للكاتبة نيكي أولسون، يصف لي كرونين، الأستاذ بجامعة جلاسجو، أحدث مشروعاته، وهو معمل كيميائي مصغر قائم على طابعة ثلاثية الأبعاد قليلة التكلفة. استخدم لي كرونين وفريقُه طابعةً مفتوحة المصدر، وهي فاب آت هوم لطباعة مصنع كيماويات مصغر أو ما يصفونه باسم «أداة التفاعل».

أداة التفاعل هي جل من البوليمر يحتوي تكوينه الداخلي على أوعية تعطيه شكلًا خاصًّا يتيح حدوث التفاعلات الكيميائية. ومثل أنبوب الاختبار الزجاجي الذي لا يتأثر بالتفاعل الكيميائي الذي يحدث داخله، فإن أداة التفاعل تتيح بيئة محايدة لحدوث التفاعلات الكيميائية من دون أي تشويش. استغل كرونين وفريقه الدقة والتحكم الرقمي للطباعة الثلاثية الأبعاد لصنع جل مخصص يحتوي على أوعية دقيقة يمكنها تحفيز التفاعلات الكيميائية بتكلفة أقل بكثير.

لا تُعتبر فكرة إحداث تفاعلات كيميائية داخلَ وعاء خاص فكرة جديدة؛ فالأوعية أو الحاويات التي تُحدث وتحفز التفاعلات الكيميائية كانت لسنوات جزءًا ضروريًّا لأي معمل تِجاري كبير. الجديد هو القدرة على تحفيز تفاعلات كيميائية معقدة باستخدام أدوات رخيصة التكلفة ومتاحة بالفعل.

يتيح الدمج بين الكيماويات والمواد الذي كان من الصعب فيما مضى تحقيقه مساحةً جديدة للتصميم ستتيح للكيميائيين استكشاف المزيد من أنواع المركبات الكيميائية الجديدة. هذا يعني سرعة الاستكشاف والابتكار، لكنه يمكن أن يعنيَ أيضًا وجود موادَّ جديدةٍ غير خاضعة للرقابة أو عقاقير استجمام جديدة.

في ملخص بحث لي كرونين الرائد في هذا المشروع، يصف قدراته قائلًا: «الطباعة الثلاثية الأبعاد تمتلك القدرة على تغيير العلم والتكنولوجيا بصنع أجهزة مخصصة قليلة التكلفة كانت تتطلب فيما مضى منشآت مخصصة لصنعها.»[3] بمعنًى آخر، التحكم المركزي

الذي تمارسه صناعتا الأدوية والكيماويات سيواجه تحدي أدوات الإنتاج والتصميم القليلة التكلفة.

كلما زادت قوة التكنولوجيا أصبح استغلالها لأغراض سيئة أكبر وصعبًا في ضبطه. ما يُطلق عليه اسم إنتاج العقاقير بنحو شخصي يكسر الطرق المتسقة والثابتة نسبيًّا لصنع العقاقير والمركبات الكيميائية. ويمكن أن يُمثِّل تصميم الناس وإنتاجهم للعقاقير والكيماويات القوية خاصتهم كابوسًا تنظيميًّا.

الحرب الدائرة ضد المخدِّرات اليوم في الولايات المتحدة فشلت بالفعل بنحو بائس؛ فالسجون ممتلئة بمجرمين غير عنيفين، وتضيع دولارات الضرائب الثمينة في القبض على مدمني المخدِّرات بدلًا من تطبيق برامج أكثر فاعلية وأقل تكلفة لإعادة تأهيلهم، وزادت الوفَيَات في الدُّول المتقدمة من جرعات زائدة من العقاقير. تخيَّل الدمار الذي من الممكن أن يحدث إذا استطاع الناس تصنيع مجموعة من التركيبات الكيماوية المفضلة لهم، والتي تغير المِزاج في المنزل بطباعة أداة التفاعل اللازمة.

ستثير مصانع الكيماويات المصغَّرة خطرًا آخر، وهو إنتاج مواد كيميائية مجهولة. إن معظم العقاقير والمواد المنزلية مصنفة في فئات معروفة؛ لذا في حالة التسمم العرضي أو تناول جرعة دواء زائدة، يمتلك العاملون في الطب إطارًا قياسيًّا للعمل، يساعدهم في فهم أثر المادة الكيميائية على الجسم وكيفية علاجه، لكن إذا طبع الناس عقاقير أو حلولًا مصممة، فإن مهنة الطب ستواجه وقتًا عسيرًا أكثر في معرفة ما تناوله الشخص بالضبط وما هو الترياق اللازم لعلاجه.

على الرغم من ذلك، فإن إنتاج الكيمياويات قليل التكلفة له القدرة على مساعدة الناس كذلك. يقول كرونين: «يمكننا تخيُّل الطابعات الثلاثية الأبعاد في المنازل لتتحول إلى مصنِّعات للأشياء المنزلية، ومنها العلاجات والأدوية. ربما بتقديم «تطبيقات مصغرة» محكومة بدقة شبيهة بما تقدمه شركة أبل، يمكننا رؤية المستهلكين وهم يستعينون بمصمم عقاقير شخصي ليستخدموها في المنزل لصنع العلاج الذي يحتاجون إليه.»[4]

## (١-٢) أمان المستهلك

خطر آخر ستثيره تقنية الطباعة الثلاثية الأبعاد، وهو أمن المستهلك، وهو أمرٌ ينظر إليه معظمنا في الدُّول الصناعية كأمر مسلَّم به. ما يسهل نسيانه هو عدد الإجراءات الوقائية

القانونية والتنظيمية التي نُفذت على مدار السنوات للتأكد من أننا لن نتعرضَ لأي أذًى بواسطة المنتجات التي نشتريها.

لم يتعرض أحد للأذى بعدُ بسبب جزء آلة بديل مطبوع لا يعمل على ما يُرام أو لُعبة مطبوعة أو بسبب الطابعة الثلاثية الأبعاد ذاتها (ليس بنحو خطير على الأقل). أحد أصعب الجوانب القانونية فيما يتعلق بأمان المستهلك ليس القبض على المجرمين لكن معرفة من المسئول قانونيًّا عند حُدوث المشكلة.

إن قانون الضرر، رغم جاذبية اسمه، يُحِل الأطراف المتورطة من اللوم (أو البراءة) عندما يتعطل منتجٌ ما ويتعرض شخصٌ ما للموت أو الإصابة.

بموجب هذا القانون، فإن مسئولية أي طرَف تنتهي إذا استطاع البرهنة على أنه قام بمجهودات كافية لرد وتقليل مخاطر فشل المنتج في ظروف الاستخدام العادية. على سبيل المثال، فإن أي مُصنِّع للإطارات يمكن تحميله مسئولية انفجار الإطارات خاصته في كل مرة تزيد فيها سرعة السيارة عن ٨٠ ميلًا في الساعة؛ وحتى لو كانت هذه السرعة مجرَّمة قانونًا، لكن هذا سيناريو محتمل الحدوث. مع ذلك، فإن نفس مُصنِّع الإطارات لن يتحمل المسئولية إذا انفجر الإطار بعد قيام الشاري بالاصطدام بسيارته في رصيف.

إليكم سيناريو ربما يحدث يومًا ما في قاعات المحاكم. قل لي: من الطرَف الجاني في هذه الحالة النظرية؟ تطبَع مُحِبَّة للسيارات بنوايا حسنة مِقْود سيارة بمواصفات خاصة بنحو ثلاثي الأبعاد في ورشتها الواقعة في قبو منزلها. لا داعي للقول إن هذا المِقْود المطبوع لم يخضع لإجراءات فحص الجودة والأمان. لقد اشترت ملف التصميم من موقع شهير يبيع إكسسوارات سيارات جديدة وزاهية مثل معطرات الجو الحديثة ومقابض ناقل الحركة.

تبيع هذه السيدة المِقْود المطبوع عبر الإنترنت ويُركبه الشاري في سيارته. وبعد بضعة أسابيع، يكتشف متأخرًا جدًّا أن المِقْود المطبوع المخصص ينفك إذا أُدير بشدة لليسار أثناءَ القيادة بسرعة كبيرة، ويموت في حادث سيارة مأساوي.

تخيَّل أنك المحامي الذي يدافع عن عائلة الشاري الذي مات في حادث السيارة، فلِمَن ستحمِّل المسئولية؟ هل للشخص الذي صَنع ملف التصميم المَعِيب؟ أم للشخص الذي طبعه بنحو ثلاثي الأبعاد وباعه؟ أم للموقع الذي أعلن عن المِقْود؟ أم ربما مصنِّع السيارة التي رُكب المِقْود فيها؟ أم صانع الطابعة الثلاثية الأبعاد؟ أم موفِّر مادة الطباعة؟

يمكن للمعايير المساعدة في وضع حدود واضحة للمسئولية. في أوائل أيام ظهور المحركات البخارية كانت الغلايات تنفجر كثيرًا، مما تسبب بنحو متكرر في حدوث

إصابات وأضرار. وكانت شركات التأمين تصر على تحديد المسئوليات بوضع معايير واضحة للإنتاج، ووُضعت في النهاية مجموعة من المعايير تحدد أدنى المتطلبات للتصديق على استخدام غلاية لضغط بخار محدد للعمل؛ مثل سُمْك المادة وهوامش الأمان وصمامات تحرير الضغط، وكانت الغلاية التي لا تتوافر فيها هذه المعايير في الغالب لا يُؤمَّن عليها.

ستُطوَّر معايير مماثلة للطباعة الثلاثية الأبعاد للمساعدة في وضع حدود للمسئوليات. سيجاهد صانعو الطابعات لترخيص طابعاتهم للعمل، وسيحاول منتجو مواد الطباعة الوفاء بأدنى المعايير المطلوبة لأداء المواد الخام أو الزيادة عليها. ومن المحتمل أن مصنعي المنتجات المعقدة المطبوعة بنحو ثلاثي الأبعاد، في غياب معايير واضحة ومحددة للمسئولية، سيتنصلون من المسئولية بنحو تام، وهو موقف ستألفه إذا قرأت ترخيص المستخدم النهائي الذي توافق عليه بسرعة في كل مرة تثبت فيها برنامجًا جديدًا. ومعظم البرامج تُباع «كما هي، من دون أي ضمان يضمن ملاءمتها لأي غرض محدد».

سيتعلم المجرمون بسرعة استخدام تقنية الطباعة الثلاثية الأبعاد لتحسين أدواتهم وخدماتهم غير القانونية. ونواجه جميعًا مخاطر جديدة إذا حالَفنا الحظ السيئ واشترينا قطعة غيار مطبوعة بنحو ثلاثي الأبعاد وتكون مقلدة أو مصنوعة برداءة لآلة معينة يمكن أن تتعطل في لحظة حرجة. ويمكن للأسلحة والكيمياويات الجديدة المطبوعة بنحو ثلاثي الأبعاد أن تكون ذات أثر مدمر إذا وقعتْ في أيدي الأشرار. وفي المستقبل البعيد، ربما تتحول السوق السوداء للأعضاء البشرية إلى سوق سوداء للأعضاء المطبوعة بنحو حيوي والتي لا تخضع لأي تنظيم.

في الواقع، إن هذه المخاوف المهمة من المحتمل ألا تؤثِّر في معظم أنشطة حياتنا اليومية بقدر كبير، وأظن أن التحديَ القانونيَّ الذي سيواجه معظمنا سيكون التعامل مع قوانين عفا عليها الزمن للملكية الفكرية.

## (٢) الطباعة الثلاثية الأبعاد وحقوق الملكية الفكرية

في العصور الوسطى، حارب الناس للسيطرة على الأراضي. ويُرجِع بعض الاقتصاديين أصول الرأسمالية الحديثة إلى العصور الوسطى حيث كانت الأراضي ذات الملكية العامة تقسم لوحدات مملوكة بنحو خاص. واليوم، تُجاهد الشركات للسيطرة على وحدات من الملكية الفكرية. وأصبحت الأفكار الثمينة تِجاريًّا هي الأراضي الجديدة التي تُمثِّل أساس اقتصادنا الحديث.

عندما انتشرت الوسائط الرقمية في أسواق المستهلكين، صنعت قضية نابستر الشهيرة نقطة تحول وحربًا معلنة بنحو رسمي بين محبي الموسيقى وصناعات الترفيه. لم يصل عالم الطباعة الثلاثية الأبعاد بعدُ إلى هذه النقطة، ويرى الناس أن الشركات الكبرى العدائية المعروف عنها أنها تحرس ملكياتها الفكرية بنحو شرس — مثل شركات الألعاب والبرمجيات والتكتلات الإعلامية — لا تشعر بعدُ بأنها بدأت تخسر المال بسبب نسخ مطبوعة بنحو ثلاثي الأبعاد من منتجاتها.

ربما يتغير أسلوب «الانتظار والمراقبة» المتبع اليوم عندما تكسب تقنيات الطباعة الثلاثية الأبعاد الزخم التِّجاري والحجم الكافيَيْن بحيث تحصل على جزء من المبيعات. وكما يقول الصحفي بيتر هانا: «إذا كنت تظن أن الطباعةَ الثلاثية الأبعاد التي تتيح كل شيء مجانًا للجميع حاليًّا أمرٌ أجمل من أن يدوم، فهي كذلك بالفعل؛ فمجتمع الطباعة الثلاثية الأبعاد اليوم صغير، وتَجنَّب — سواء بالصدفة أو عن قصد — الصدام مع أيٍّ من اللاعبين الكبار.»[5]

هناك عُتاة من منتهكي القانون، لكن المستهلكين المتحمسين وأصحاب المشروعات الصغيرة شيء آخر. يُفضِّل معظم الناس ومُلاك المشروعات الصغيرة وجود مجموعة واضحة من الإرشادات القانونية تخص الطباعة الثلاثية الأبعاد.

دعونا نستكشف سيناريو افتراضيًّا؛ يطبع مالك شركة صغيرة أو فرد هاوٍ بحسن نية بنحو ثلاثي الأبعاد، تمثالًا صغيرًا من البلاستيك، وهو نسخة طبق الأصل من شخصية رسوم متحركة شهيرة محميَّة بموجِب حقوق النسخ، ثم يعرض صانع اللعبة التمثال الصغير للبيع عبر موقعه على الإنترنت بمبلغ ٢٠ دولارًا.

بعد بضعة أسابيع، يرى المحامون العاملون في شركة عالمية للإعلام والألعاب النسخَ المطبوعة من التمثال متاحة للبيع عبر الإنترنت، ويرسلون رسالة «وقف وامتناع». والتهمة هي صنع نسخة غير مرخصة من لعبة محميَّة بموجِب حقوق النشر من دون الحصول على إذن الشركة العالمية ودفع مقابل للحصول على ترخيص بالطباعة، وتنص الرسالة على أن يزيلَ صانع اللُّعبة التمثال الصغير المطبوع من الموقع أو يتفاوض للحصول على ترخيص.

هنا، إذا كان صانع اللعبة حَسن النية ولا يدرك ما يسمَّى بقانون حقوق النشر، فسيزيل بسرعة وبأسًى اللُّعبة من موقعه، أو ربما أن صانع اللُّعبة لا يمتلك الجرأة الكافية أو المال الكافيَ ليستعين بمحامٍ ويدخلَ في معركة قضائية مع الشركة الكبيرة. هذا كل ما هنالك.

لكن ماذا لو سار الموقف بنحو آخر؟ ماذا لو قرر صانع اللُّعبة بعد وصول رسالة الوقف والامتناع من الشركة الكبيرة أنه في الواقع لا يخرق حقوق النشر الخاصة بها. ربما يوافق على التسوية ويتوقف عن بيع اللُّعبة الأصلية المطبوعة بنحو ثلاثي الأبعاد المسببة للمشكلة. وبدلًا من ذلك، سيصمم ويبيع مجموعةً جديدة من التماثيل الصغيرة المطبوعة، وهي تماثيلُ بلاستيكية صغيرة تُمثِّل رءوسَ رؤساء دول مختلفة من جميع أنحاء العالم. هذه الرءوس ستوضع فوق أجسام لشخصيات شهيرة خاصة بالشركة الكبيرة. ومثل هذه التعديلات سيكون من السريع إنجازها ببرنامج تصميم وطابعة ثلاثية الأبعاد.

وتستمر الحكاية؛ فالشركة الكبيرة منزعجة وترسل إلى صانع الألعاب الجريء رسالة وقف وامتناع أخرى. ومعظم الناس أو أصحاب الشركات الصغيرة سيستسلمون عند هذه المرحلة؛ فهم لا يقدِرون على مقاضاة شركة عالمية عملاقة، ويتجاوزون المحنة بسلام، وخاصة إذا خسروا.

تستمر الملحمة الافتراضية؛ حيث يؤسس أحد الخيِّرين من أنصار حماية الحقوق المدنية صُندوقًا للمواجهة القضائية لمثل هذه المشكلات. وبمجرد سماعه بالأمر، يتدخل هذا الرجل ويعرض دفع فواتير المسائل القضائية، لكن من يبيع هذه التماثيل المطبوعة شخص مثالي؛ فهو يؤمن بشدة بأن قوانين حقوق النشر يجب تعديلها لتوفير إطار عمل عادل وعمليٍّ للطباعة الثلاثية الأبعاد، ويقرر أن يكونَ على قدر التحدي ويدفع المعركة القانونية إلى أقصى مدًى لها ضد الشركة الكبيرة.

ما الذي سيحدث بعد ذلك؟ لا نعرف بعدُ، لكن الشركة الكبيرة ربما ستقيِّم التكاليف القانونية المحتملة مقابل الخسارة البسيطة في المبيعات التي تسبب فيها صانع التماثيل الصغيرة الثلاثية الأبعاد. في هذه الحالة، من المحتمل أن يقرر المديرون التنفيذيون للشركة الكبيرة أن الدعاية السيئة والتكاليف القانونية لا يساويان الفقد البسيط في العائد. مع ذلك، إذا بدأ الملايين من الشركات الصغيرة والمستهلكين في طباعة ألعاب محميَّة بحقوق نشر بنحو ثلاثي الأبعاد، فإن الشركة الكبيرة ستُضْطر للمواجهة والدخول في معاركَ قضائيةٍ. يمكننا إعادة السيناريو الافتراضي هذا بطرق عديدة مختلفة، وإذا كان الموقف يتضمن قطعة بديلة لإحدى الآلات مسجلة ببراءة اختراع ومطبوعة بنحو ثلاثي الأبعاد، فمن المحتمل أن يَنتج موقف قانوني مشابه.

وقتَ كتابة هذا الكتاب، لم تحدث بعدُ معركةٌ قانونية كاملة حولَ خرق لحقوق الملكية الفكرية. ونظرًا للسوابق القانونية المنشأة من خلال القضايا الخاصة بالوسائط

الرقمية، فحدوث هذا وشيك، وقد بدأت بالفعل بضع مناوشات قانونية سريعة حول حقوق الملكية الفكرية.

صَمم شاب من المملكة المتحدة وطبع، بنحو ثلاثي الأبعاد، نسخةً بلاستيكية طبق الأصل، مستوحاة من أحد مجسمات شخصيات الرسوم المتحركة المملوكة لأخيه. لم تكن شركة «باراماونت» المصنِّعة لتلك المجسمات سعيدة بهذا؛ فأرسل محاموها رسالةَ تهديد للشاب، طالبوه فيها بحذف لُعبته المطبوعة، وحذروه من أن ما يفعله يخرق حقوق النشر الخاصة بالشركة. للأسف رضخ الشاب لهم بعد صدمته بالتهديد القانوني غير المتوقع.

يُعتبر قانون الملكية الفكرية سلاحًا ذا حدين؛ فيمكن للشركات الكبرى سحق منافسيها ووأد التقنيات المبتكرة مستخدمين المِلْكية الفكرية كسلاح لها. ومع ذلك، فإن صغار المخترعين والفنانين يعتمدون على حقوق الملكية الفكرية حتى يحصلوا على مبالغَ عادلةٍ من الناس أو الشركات التي تستفيد ماديًّا من اختراعاتهم أو أعمالهم الفنية. ولم يكن طالبُ المرحلة الثانوية المشارك في دورة التصميم والهندسة الصيفية الخاصة بنا والذي كان مهتمًّا بمسألة الملكية الفكرية، قلقًا من أن تنفذ شركة كبرى أفكاره دون إذنه؛ بل كان قلقًا من أن تسرقَها وتنسبَها لنفسها.

يكمن التحدي في هذا الأمر في وضع إطار عمل قانوني عملي لفهم المناطق الرَّمادية الكبرى والمنظورات المختلفة. من البسيط نسبيًّا تطبيق قوانين الملكية الفكرية الموجودة بالفعل بالقوة عندما يكون الجناةُ محترفي قرصنة أو مزوِّرين ينتهكون ملكية الآخرين عن عمد وبنحو تخريبي. لكن عندما تصبح الطباعةُ الثلاثية الأبعاد تقنيةً شائعة، فإن الأشرار التقليديين سيصبحون هم الاستثناء.

## (٢-١) العلامات التِّجارية

كنتُ ذاتَ مرة في جزر الكاريبي في سوق مفتوحة، واشتريت حقيبة رياضية كبيرة رخيصة من القماش عليها علامة «نايكي» الرياضية على جانبها لكن بتعديل بسيط؛ كانت علامة الصح الخاصة بنايكي تقطع أخرى رأسية أصغر منها في الحجم. السبب في امتلاك الحقيبة المشابهة لحقائب نايكي الرياضية هذه العلامة الزائدة هو حماية صانعها من خرق العلامة التِّجارية للشركة الكبرى.

ومثل حقوق النشر وبراءات الاختراع، فإن العلامات التِّجارية تُعتبر من حقوق الملكية الفكرية. يخلِط الناس بين العلامة التِّجارية و«الاسم التِّجاري» أو «الشعار التِّجاري».

عادةً ما تكون العلامة التِّجارية أكثر تحديدًا من هذا؛ فهي عادة علامة مسجلة أو «مظهر تِجاري» يشير إلى المستهلكين أن هناك منتجًا صنعته شركة معينة.

الغرض الأساسي للعلامة التِّجارية كان حماية المستهلكين. ومنذ ذلك الحين أصبحت أداة تسويق بشكل أكبر، ويمكن أن تصل قيمة العلامة التِّجارية المميزة إلى مليارات الدولارات.

ومثل براءات الاختراع، فإن العلامات التِّجارية يجب الحصول عليها من هيئة حكومية مركزية؛ فلا يمكنك بكل بساطة تسجيل شعار جذاب كعلامة تِجارية، فيجب أن يكون المنتج الذي ستضع عليه الشعار متاحًا للبيع. وإذا مرت خمس سنوات (وهذا يختلف من دولة لأخرى) من دون أن تتيح منتجك الحامل للعلامة التِّجارية للبيع، فتعتبر العلامة التِّجارية علامة مُهمَلة، ويمكن لأي شخص استخدامها.

## (٢-٢) حقوق النشر

تحمي براءاتُ الاختراع الاختراعاتِ التي تمتلك نوعًا من القيمة المفيدة، كما يجب أن تكون العلامات التِّجارية نشطة تِجاريًّا. على العكس، فإن حقوق النشر تنطبق على الأعمال الإبداعية.

الفكرة في حقوق النشر هي أن أي عمل فني هو عمل تعبيري، ولا يهدف لمنفعة أو فائدة. وكما يفسر المحامي وخبير الطباعة الثلاثية الأبعاد، ويليام واينبرج: «الأجسام التي تقوم بوظائف لا يمكن حمايتها بحقوق النشر. الاستفادة كلمة فضفاضة، والملابس شيء مفيد، ويمكنك حماية شكلٍ ما يزين قطعة من الملابس بموجِب حقوق النشر، لكن لا يمكن بموجِبها حماية طريقة التفصيل نفسها.»[6]

ومثل براءة الاختراع، فإن حقوق النشر تعطي صانع العمل الأصلي حقوقًا حصرية لاستغلاله لمدة معينة من الوقت (وتختلف هذه المدة من بلد لآخر، لكن المدة القياسية هي عمر صانعه، ويزيد عليه ٧٠ عامًا). ويجب على الناس أو الشركات طلب إذن مالك حقوق النشر؛ من أجل إعادة إنتاج أو تعديل العمل أو بيعه أو إقراضه أو عرضه بنحو عام أو تقديمه أمام جمهور. ولا يحتاج الناس إلى الحصول على إذن إذا كانوا يخططون لاستخدام عمل أصلي فيما يسمَّى «الاستخدام العادل» مثل استخدامه في فصل دراسي على سبيل المثال.

وعكس براءة الاختراع، فإن حقوق النشر لا تُمنح من خلال عملية تقديم رسمية لوكالة حكومية مركزية. تظهر حماية حقوق النشر عندما يُقدم عمل إبداعي من خلال وسط ما. وتتيح الحكومات تسجيلًا رسميًّا لحقوق النشر، لكن على الرغم أنه من الممكن أن يكون التسجيل الرسمي وسيلة مفيدة لتحديد الأسبقية والملكية في حالة حدوث خلاف قضائي، فإنه ليس ضروريًّا.

من يمتلكون حقوق النشر يمكنهم محاولة محاربة خرق هذه الحقوق بمقاضاة من يدَّعون خرقَه لها. على الرغم من ذلك، وقبل البدء في إقامة دعوى قضائية، فإن صاحب الحقوق يجب عليه أولًا أن يطلب من المتهم بخرقها أن يتوقف عما يفعله باستخدام ما يُسمَّى بإخطار وقف، وإذا لم يكن المتهم بالخرق يدرك أنه يخرق حقوق النشر ويُوقِف ما كان يفعله، فلن يكون هناك أي مشكلة. المشكلة هنا — والتي تحدث بنحو متكرر — هي أن المتهم بالخرق ربما لا يكون قد خرق الحقوق بالفعل، لكن معظم الناس لا يريدون الذهاب إلى المحاكم لمعرفة هذا.

نظن أن أحد أكثر الأمور الشائكة في المعارك المستقبلية المتعلقة بحقوق النشر سيكون التعامل مع مسألة «الأعمال المشتقة»؛ فطبقًا لقانون حقوق النشر، فإن العمل المشتق هو عمل إبداعي يتضمن بعض المواد المنشورة سابقًا، والمحميَّة بموجِب حقوق النشر؛ فالترجمات تُعد مثالًا للعمل المشتق، كما تُعتبر الأغنيات الساخرة من أغانٍ شهيرة أعمالًا مشتقة.

إذا عَدَّلت ملف التصميم لجسم موجود ومحميٍّ بحقوق النشر لصنع جسم جديد، ففي أي مرحلةٍ أنت تصنع عملًا مشتقًّا؟ وفي أي مرحلةٍ أنت تصنع عملًا جديدًا تمامًا (أي إنك الصانع)؟ أم أنك، عن عمد أم لا، تسرق ببساطة المجهود الإبداعي لشخص آخر؟

إذا تصفحت أي موقع إلكتروني يعرض منتجات مطبوعة بنحو ثلاثي الأبعاد أو ملفات تصميم للبيع أو للتبادل، فربما ستقابل القليل من الأشياء التي ربما تكون محمية بموجب حقوق النشر. لكن السبب في أن الشركات الكبرى التي لها منتجات ذات علامات تِجارية لا تقاضي صغار المصممين ومحبي الطباعة الثلاثية الأبعاد ليس هو النية الحسنة بل المال؛ فالبضائع المطبوعة بنحو ثلاثي الأبعاد التي يمكن أن تخرق حقوق النشر لشخص ما لا تُباع بأعداد كبيرة تكفي لتَدُق أجراسُ الإنذار بالنسبة إلى شركة ألعاب كبرى أو شركة عالمية للبضائع الاستهلاكية.

## (٢-٣) براءات الاختراع

أحد الاعتقادات الخاطئة الشائعة عن براءات الاختراع هو أن الحصول عليها يعني أن فكرتك ستظل سرية، لكن الأمر هو العكس تمامًا؛ فعندما يحصل مخترع على براءة اختراع لابتكار ما، تُفصح هيئة براءات الاختراع في الدولة عن المعلومات الضرورية التي تُمكِّن شخصًا آخر «ماهرًا في الفن» من تكرار الابتكار.

أحد الأسباب التي دفعت الحكومات إلى إنشاء هيئة مركزية لبراءات الاختراع كان إعطاء المخترعين الحافز للكشف عن ابتكاراتهم علنًا، وطبقا لموسوعة ويكيبيديا، فإن براءة الاختراع في الواقع هي «حق ملكية محدود، تمنحه الحكومة للمخترعين مقابل موافقتهم على مشاركة تفاصيل اختراعاتهم مع الآخرين. ومثل أي حق ملكية آخر، يمكن أن يُباع أو يُرخَّص أو يُرهَن أو يُنقَل أو يُخصَّص أو يُوهَب أو يُتنازَل عنه بكل بساطة.»[7]

هناك فرق قانوني كبير بين براءة الاختراع وسر المهنة. سر المهنة هو عندما يَمنع مخترعٌ ما منافسيه من استخدام نفس فكرة المنتَج ببساطة بعدم إخبار أي شخصٍ عن كيفية عمل ذلك المنتَج. ولا يتم أبدًا الكشف عن سر المهنة، كما أنه لا يحصل على فترة حماية رسمية محددة ولا يُحدد له تاريخٌ يُكشف عنه بعده.

لكي يكونَ الابتكار قابلًا للتسجيل كبراءة اختراع، يجب أن يكون جديدًا ومفيدًا؛ كما يجب أن تكون عملية أو آلة أو أداة تصنيع أو تركيب لمادةٍ مبتكرةً بما يكفي. في الولايات المتحدة، تدوم براءة الاختراع لعشرين عامًا من تاريخ تقديمها لهيئة براءات الاختراع. بمجرد إصدار براءة الاختراع، فإنها تَمنح صاحبها الحق في منع الآخرين من استعمال الاختراع. يتقدم المخترعون للحصول على براءات الاختراع في وكالة حكومية مدارة بنحو بمركزي، تُسمَّى داخلَ الولايات المتحدة «مكتب براءات الاختراع الأمريكية». ويمكن أن يكون المخترع الذي يريد الحصول على براءة اختراع فردًا أو مجموعة من الناس أو شركة أو عدة شركات.

الطريقة الوحيدة لتفعيل حقوق براءة الاختراع هي المقاضاة. إذا كنتَ مخترعًا تمتلك براءة اختراع، وتظن أن شركة أخرى تستخدم اختراعك من دون موافقتك، فيمكنك مقاضاتهم بخرق براءة الاختراع. ومن المعروف أن فك اشتباك الأفكار في المحاكم أمرٌ معقد. على سبيل المثال، فإن أي تقنية — الهاتف المحمول على سبيل المثال — يمكنها أن تتضمن آلاف التقنيات التي تحميها براءات الاختراع التي يمتلكها مِئات المخترعين المختلفين.

يكمن التحدي في أن عملية نسخ أجسام معينة وطباعتها بنحو ثلاثي الأبعاد لا تتوافق مع التصنيفات التي ذُكرت آنفًا بنحو دقيق، فإذا لم تكن تقنية المنتج محميَّة ببراءة اختراع، فلا يوجد هناك أي خرق لتلك البراءة. وإذا لم تكن هناك علامة تِجارية مسجلة لتلك الأجسام الثلاثية الأبعاد، فلا يوجد هناك أي خرق للعلامة التِّجارية. وأخيرًا، إذا كان الجسم المادي ذا فائدة أو منفعة ما، فهو ليس محميًّا بحقوق النشر كذلك.

### (٤-٢) إدارة الحقوق الرقمية

من الصعب تطبيق قانون الملكية الفكرية؛ وخاصة عندما يصنع مليارات الأشخاص حول العالم نسخًا من أشياءَ ويتشاركونها مع أصدقائهم بكل سعادة؛ فأصحاب حقوق الملكية الفكرية لن يمكنهم مقاضاة كل هؤلاء، فالشركات الإعلامية التي تحاول حماية حقوق الملكية الفكرية خاصتها من خلال القضاء تخوض معركة خاسرة، وكما يقول نيل جيرشينفيلد، الأستاذ بمعهد ماساتشوستس للتكنولوجيا: «لا يمكنك مقاضاة الجنس البشري بأكمله.»

وبما أن القضايا مكلفة للغاية وبطيئة وغير فعَّالة — وخاصة ضد المستهلكين — فإن الشركات الكبرى تتَّبع أسلوبًا شائعًا للدفاع عن حصصها في السوق، وهو الإجراءات الوقائية التقنية، أو ما يُسمَّى بإدارة الحقوق الرقمية. على سبيل المثال، تطبق شركة أبل إدارة الحقوق الرقمية على الملفات التي تنشرها على تطبيق آي تيونز خاصتها لمنع الناس من صنع أكثر من عدد معين من النسخ. وعندما يكسر الناس حماية هواتف الآي فون، فإن السبب الذي يتيح لهم تنزيل أي شيء يريدونه دون دفع أي مقابل هو أنهم تخلصوا من إدارة الحقوق الرقمية. هذه الإدارة هي السبب الذي يمنع نسخ أي كتاب إلكتروني على قارئ إلكتروني آخر.

لا تمتلك برامج التصميم التِّجارية والطابعات الثلاثية الأبعاد نظامًا رسميًّا لإدارة الحقوق الرقمية حتى الآن. في عام ٢٠١٢، حصل فرع لشركة وساطة براءات الاختراع إنتلكتيوال فنتشارز على براءة اختراع رقم ٨٢٨٦٢٣٦. كان الاختراع الحاصل على البراءة يخص إدارة الحقوق الرقمية لآلات التصنيع ومنها الطابعات الثلاثية الأبعاد. باختصار، فإن ملفات التصميم ستحتوي على تقنية لإدارة الحقوق الرقمية، فإذا قرأتْ طابعة ثلاثية الأبعاد أي ملف تصميم محتوٍ على هذه التقنية فإنها سترفض طباعته وهو ما يشبه رفض أي تطبيق برمجي للعمل بعد انتهاء مدة صلاحية رمز الترخيص خاصته.

ربما تكون تقنيات إدارة الحقوق الرقمية محاولة لا طائل منها لكبح التيار الجارف الخاص بالطباعة الثلاثية الأبعاد. هذه التقنيات تخلق سباقًا جاريًا في التسلح بين المستهلكين والشركات. وفيما يتعلق بالطباعة الثلاثية الأبعاد، هناك تعقيد آخر: الأجسام المحميَّة بحقوق النشر أو براءة الاختراع التي تخضع للمسح الضوئي ثم الطباعة الثلاثية الأبعاد لا تلتقطها إدارة الحقوق الرقمية المغروسة في ملفات التصميم. وكما يوضح سايمون برادشو وأدريان بوير وباتريك هاوفه: «المشكلة هي مشاركة التصميمات التي تخضع للهندسة العكسية — والتي يُنظر إليها كأمر مشروع — وليس مستندات التصميم الأصلية.»[8]

صنعت مؤسسة البرمجيات الحرة — ربما تحسبًا لصراع جديد يخص إدارة الحقوق الرقمية — برنامج اعتماد يُسمَّى «احترم حريتك». تعتمد المؤسسة بائعي الأجهزة الإلكترونية الذين تَستوفي منتجاتُهم معاييرَ المؤسسة الخاصة بحُرية المستخدم والتحكم في المنتج والخصوصية، وتصف المؤسسة على موقعها معاييرها لبرنامج الاعتماد هذا، فتقول: «نحتاج، كمواطنين وعملاء لتلك الشركات، إلى التعبير عن رغبتنا في نوع جديد من الأجهزة يمكن للجميع دعمها لأنها تحترم حريتك.» كان أول من حصل على الاعتماد طابعةً ثلاثية الأبعاد من طراز «لولز بوت» والتي تبيعها شركة «ألف أوبجيكتس».

قرأت مؤخرًا أن بعض الاستبيانات تشير إلى أن معدلات القرصنة على ملفات الموسيقى بدأت أخيرًا في التراجع. لم يتوقف الناس عن نسخ ملفات الموسيقى بسبب خوفهم من العقاب القانوني. بدلًا من ذلك، أصبح محبو الموسيقى يدفعون المال عن طيب خاطر لشراء ملفات الموسيقى بسبب أن شركات الموسيقى في النهاية اتبعت أسلوبًا أفضل في بيع الموسيقى الرقمية؛ إذ أصبحت الألبومات الموسيقية تَصدُر بسرعة بنحو رقمي (ولا تتأخر عن عمد)؛ كما أصبحت المتاجر الإلكترونية أكثر سهولة في الاستخدام وتطورت تقنيات التنزيل والدفع عبر الإنترنت.

## (٣) الحصرية مقابل حرية الابتكار

لماذا تنفق الشركات مبالغَ كبيرة مقابل الخدمات القانونية لمنع منافسيها والعملاء من صنع نسخ من منتجاتها؟ الافتراض الشائع هو أن امتلاك الحق الحصري لصنع أو بيع منتج معين أو علامة تِجارية معينة هو مِفتاح تحقيق الربح. وهذه الفكرة عميقة الجذور؛ فيصر المدافعون بشدة عن حقوق الملكية الفكرية على أن تفعيل تلك الحقوق والتحكم فيها على نحو صارم يصنعان أساسًا لاقتصاد قوي وقائم على الإبداع.

لكن الواقع هو أن الأمر ليس بهذه البساطة؛ فكل منتج أو مجال صناعي يستفيد بدرجة مختلفة. بمعنى آخر، إن حقوق الملكية الفكرية ليست ضرورية دائمًا لتحقيق الربح. في الواقع، فإن بعض الناس يدَّعون أن براءات الاختراع وحقوق النشر في الواقع تخنق التدفق الحر للأفكار الضروري لمساعدة الشركات الإبداعية في النمو والازدهار.

## (٣-١) طابعة ريب راب

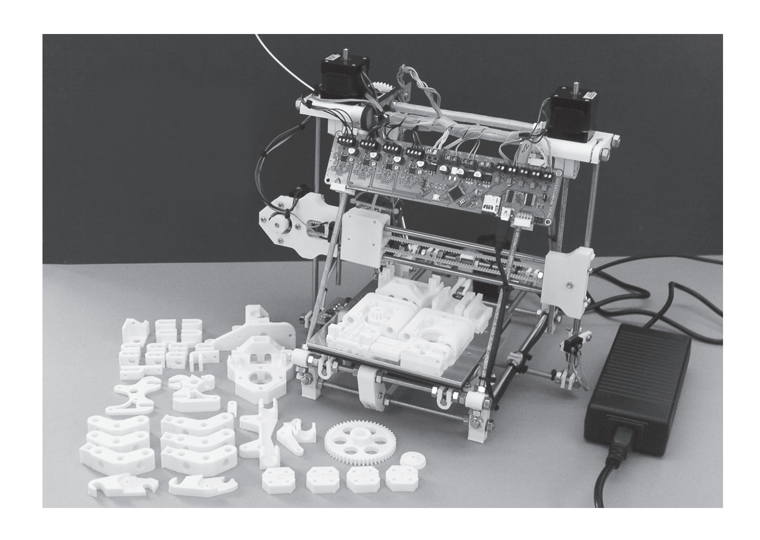
لمعرفة المزيد عن الطباعة الثلاثية الأبعاد والحصول على منظور بديل حول الملكية الفكرية، سافرنا إلى التلال المرتفعة الممتدة في جنوب غرب إنجلترا للتحدث إلى أحد أكثر الأشخاص تأثيرًا في مجال الطباعة الثلاثية الأبعاد، وهو أدريان بوير، صانع طابعة «ريب راب» الشهيرة. يقول أدريان: «براءات الاختراع تَكبح جِماح التطور، هذا أمرٌ لا جدال فيه؛ فهي بطبيعتها تمنح حق احتكار لأي شخص يمتلكها لمدة ٢٠ عامًا.»

ويضيف أدريان قائلًا: «لقد سجل جيمس واط براءة الاختراع للعديد من الجوانب الحيوية للمحرك البخاري، لكن انظر إلى ما حدث لتطور المحرك الذي لم يتغير طيلة عشرين عامًا من عمر براءة اختراع وات، لكن عندما انتهت صلاحية براءة الاختراع، حدث تطور وابتكار كبيران ثم حدثت الثورة الصناعية.»

عندما صنع أدريان وطلابُه طابعة ريب راب في عام ٢٠٠٤، لم يكن لديهم أي علم أنها ستصبح تقنية ثورية وتجرِبة في حقل حقوق الملكية الفكرية. ظهر مشروع ريب راب في جامعة باث. تقع مدينة باث القديمة بالقرب من المنزل السابق للروائية جين أوستن. تحيط بالمدينة أقواسٌ حجرية قديمة بُنيت خلال العصر الروماني، كما تتخلل البيوت الكبيرة التي أُعيد ترميمها التلال الخصبة الممتدة.

وسط هذه العجائب الأثرية القديمة، ظهرت طابعة ريب راب كشكل حديث ثوري من تطور المنتج. منذ البداية، كانت الطابعة تمتلك خاصيتين جعلتاها متفردة. الأولى، هي أن أدريان قرر مشاركة مخططاتها الأساسية مجانًا عبر الإنترنت باستخدام ترخيص مفتوح المصدر. لم يسْعَ عن عمد للحصول على براءات اختراع تخص تقنية الطباعة والتصميم للطابعة. ثانيًا: صُممت الطابعة باستراتيجية عمل غير تقليدية، وهي ألَّا يحتاجَ مستخدمها إلى شراء طابعة أخرى من نفس النوع مطلقًا.

كانت الرؤية طويلة الأمد للمشروع هي أن كل طابعة ريب راب ستكون قادرة على صنع قطع الغيار خاصتها. بهذه الطريقة، فإن قطع الغيار هذه يمكن طباعتها



طابعة ريب راب ثلاثية الأبعاد مفتوحة المصدر يمكنها صنع معظم المكونات غير التقليدية التي صُنِعت منها مما يؤدي إلى تحفيز إعادة إنتاجها وتحدي الأطر النظرية للملكية الفكرية (الصورة مهداة من أدريان بوير ومشروع ريب راب).

ولن يكون هناك حاجة لشرائها. وإذا أراد مستخدم ما صنع طابعة ريب راب جديدة (أو الآلاف منها)، فإنه ببساطة سيَطبع بنحو ثلاثي الأبعاد أجزاءها على طابعته التي يَستخدمها ويجمعها بنفسه. ومثل توالد الأرانب، فإن صنع طابعة ريب راب يمكن أن يتزايد بمعدل مطَّرِد.

تجلب فكرة الآلة التي تتكاثر ذاتيًّا للأذهان صورةً شهيرة للرسام الهولندي إيشر التي تصوِّر رجلًا يرسم رجلًا يرسم رجلًا، وهلمَّ جَرًّا لما لا نهاية؛ حتى تصبح الرسومات المتناهية الصغر ولا يمكن رؤيتها. إن معظم الآلات وحتى التي تكون مخططاتها الأولية مفتوحة المصدر لا يمكنها تصنيع قطعها البديلة، أما طابعة ريب راب، فهي النسخة المادية من لوغاريتم حاسوبي متكرر بنحو لا نهائي.

يمكن أن يؤديَ هذا إلى عدة أشكال من الإخلال بالنظام السائد. إذا استطاعت آلةٌ صنعَ قطع الغيار خاصتها، فسيكون من الصعب لأي شركة ادعاء امتلاكها لحقوق براءة اختراع بشأنها والدفاع عنها. استراتيجية أخرى للعمل شائعة الاستخدام، وهي التقادم

المخطط ستنتهي تمامًا كذلك. تستفيد بعض الصناعات إذا تعطلت منتجاتها بسرعة، لكن فقط في اللحظة المناسبة. في هذه الحالات، فإن المهندسين يحسبون كيف يصممون ويصنعون منتجًا بأفضل طريقة ممكنة؛ حتى يبقى لأطول فترة ممكنة حتى ينتهيَ الضمان، لكن ليس كثيرًا بعد ذلك. لا تتصور أن هذا الأمر مَحْض خيال وليس له أساس في الواقع.

سألنا أدريان عن رؤيته لبراءات الاختراع، فقال: «أحد الأمور التي لا يبدو أن كثيرًا ممن يعملون فيما يُسمَّى بالأعمال التقليدية يفهمونها هو أنه من الممكن أن تمتلك شركة تبيع أشياءَ مجانًا بالكامل، وما زال يمكنك الحصول على ربح. سيقول الناس إنك لا تمتلك أي حقوق ملكية فكرية؛ فكيف سيمكنك تحقيق الربح؟ والإجابة هي: يجب أن تجد طريقة لإضافة قيمة.»

إن مشروع ريب راب ليس ضد التجارة. عندما يناقش أدريان الأثر الخاص بمشاركة تصميمات الآلات بنحو مجاني، يوضح أن براءات الاختراع وحقوق النشر يجب أن تكون ببساطة خيارًا من ضمن خيارات عدة. في الواقع، وفي وقت كتابة هذا الكتاب، فإن أدريان كان يُنهي فصله الدراسي الأخير في جامعة باث ولديه خطط لإطلاق شركة ناشئة لبيع خدمات طابعة ريب راب.

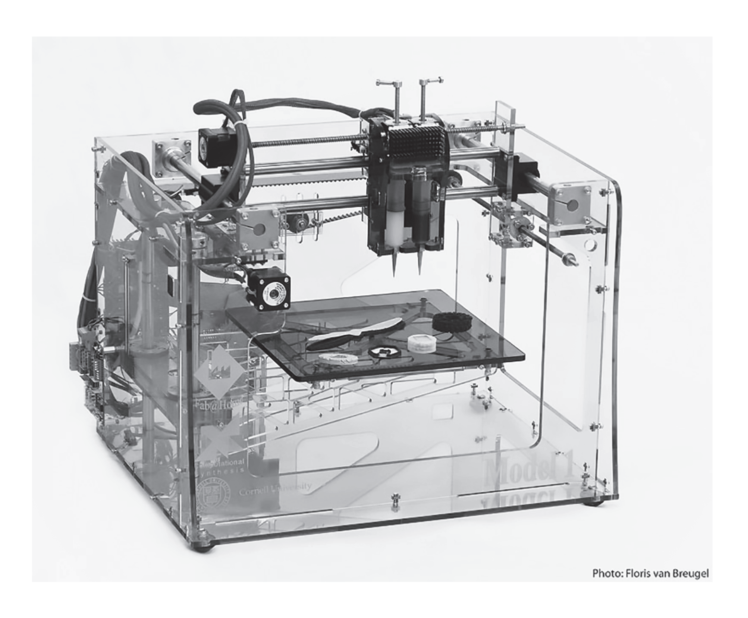
فسر أدريان هذا الأمر: «فكرة أنه لا يمكنك إدارة شركة رابحة بسبب تخليك عن الملكية الفكرية هي مَحْض هُراء واضح. كل ما يمكنك القيام به هو إضافة قيمة.» إن منظور أدريان عن الملكية الفكرية منظور مباشر: إذا كانت قوانين الملكية الفكرية لا تفيد الناس، فهناك حاجة إلى تغييرها.

مستخدمو طابعات ريب راب وفاب آت هوم لهم الحرية في الحصول على براءة اختراع للتحسينات التي يدخلونها عليها؛ على سبيل المثال، رأس طباعة خاصٍّ يتحمل وضعه وغسله في غسالة الأواني. يوضح أدريان أن مقاضاة أي صاحب شركة لعملائه أمرٌ فَظ وعقيم لحماية نموذج العمل خاصته. يقول في هذا الإطار: «أي تطور أو تحسُّن في برنامج أو تصميم أو إلكترونيات طابعة ريب راب يأتي من مبادرات المستخدمين أنفسهم، فليس هناك أي جهة رئيسية تعطي الإرشادات؛ فالمستخدمون أنفسهم يستثمرون الوقت والتفكير في العملية التطورية لتصميم الطابعة. وإذا أَلهموا مستخدمين آخرين فيمكنهم التجمع معًا ودمج مجهوداتهم.»

تُعتبر طابعة ريب راب تجسيدًا للتصميم والإنتاج اللذين يتحكم فيهما المستخدم تمامًا. ومثل طابعة فاب آت هوم الثلاثية الأبعاد، فإن المخططات الأولية لتصميم طابعة

ريب راب مفتوحة المصدر. ومثل كود برنامج مفتوح المصدر، فإن التعليمات لبناء طابعة ريب راب أو فاب آت هوم متاحة بالمجان عبر الإنترنت؛ فلا يدفع المستخدمون أي رسوم أو مبالغ للحصول على حقوق النشر.

وَجد بعض العناصر من تصميمات ريب راب وفاب آت هوم طريقَه داخلَ النماذج التِّجارية. تتمثل إحدى النتائج البارزة في الطابعة «ريبليكيتور ١» من شركة ميكربوت، وهي إحدى أشهر الطابعات الثلاثية الأبعاد تجاريًّا على مستوى المستهلكين في السوق. اليوم يمكن العثور على طابعتَيْ ريب راب وفاب آت هوم في كل مكان حول العالم، إحداهما صُممت بِناء على المخططات الأولية الأصلية والأخرى على تصميمات معدلة.




مشروع طابعة فاب آت هوم ثلاثية الأبعاد ومفتوحة المصدر (٢٠٠٦) (الصورة مهداة من فريق فاب آت هوم وتصوير فلوريس فان برويجل).

إذا أثرت هذه الطابعات مفتوحة المصدر في مثيلاتها التِّجارية، فإنه من الجدير ذكر أن تقنية الطباعة التِّجارية أثرت في طابعتَي ريب راب وفاب آت هوم. مع ذلك، فإن شركات الطباعة الثلاثية الأبعاد التِّجارية التي امتلكت براءات الاختراع، والتي تعرضت

للخرق من قبل تصميم طابعة ريب راب، لم تحاول قط إيقاف مشروع ريب راب (على الأقل حسب عِلمنا)، ربما بسبب أن مشروع ريب راب لم يتضمن بيع أو تصنيع طابعات ثلاثية الأبعاد بنحو مباشر، ولكن تضمَّن فقط المشاركة المفتوحة لتصميمات الطابعات. ربما يرجع هذا إلى أن الشركات الكبرى هذه أدركت أن الدعاية الإيجابية التي نتجت عن مشروع ريب راب ستزيد من شهرة مجال الطباعة الثلاثية الأبعاد بالكامل، أو أنها أدركت أنه إذا استخدم الطلاب طابعات ريب راب في المدرسة، فإنهم سيتخرجون ويحصلون على وظائف، وفي النهاية سيستخدمون الطابعات التِّجارية الحديثة في العمل.

ما الذي سيفعله توجه ريب راب — المتمثل في تجنب حقوق الملكية الفكرية والتحكم في إنتاج وتصميم الطابعة — في الأفكار التقليدية عن التجارة؟ يعتقد أدريان أن السلع المادية تصبح أكثر سهولة في صنعها وتوافرها. يقول في هذا الشأن: «العملة الجديدة للمجال ستكون الحصرية.» فكلما زادت سهولة صنع نسخ من الأجسام المادية، جاهد الناس لامتلاك أشياء لا يمتلكها أحد غيرهم.

إذا أصبحت الحصرية الميزة التنافسية الجديدة، فإن النتيجة ستكون سباقًا محمومًا في الأصالة والابتكار بين المستهلكين والشركات؛ فمن جانب، تسهِّل أكثر أدوات التصميم والطباعة الثلاثية الأبعاد صنع سلع فريدة وحسب الطلب. لكن على الجانب الآخر — وللمفارقة — فإن نفس هذه الأدوات ستسهِّل النسخ والتعديل البسيط لمنتج فريد من نوعه.

أثناء حديثنا مع أدريان، أوضح قائلًا: «بمجرد أن تظهر الأفكار الجديدة أو أن تصبح فكرة قديمة كانت باهظة جدًّا رخيصة جدًّا بسبب التكنولوجيا، فإن الفكرة الجديدة ستغرق العالم بفضل تقنيات الاتصال التي نمتلكها حاليًّا.» بمعنًى آخر، عندما يمكن لأي شخص صنع أي شيء تقريبًا، سيصبح قانون الملكية الفكرية أداةً غير مجدية في التحكم في انتشار الأفكار.

بطريقة ما، عندما تصبح الهندسة العكسية للأجسام المادية ونسخها أكثر سهولة، فإن قوانين الملكية الفكرية ستصبح أكثر أهمية لأي شركة تحاول الحفاظ على مكان مناسب لها في السوق. على الرغم من ذلك، فإن تفعيل حقوق الملكية الفكرية بالقوة — سواء عن طريق القانون أو إدارة الحقوق الرقمية — ليس أمرًا فعالًا دائمًا. يلخص أدريان الأمر قائلًا: «يجب على قانون براءة الاختراع العمل بنحو قوي لإحداث أقل أثر على الاقتصاد. عندما يستخدم السياسيون قانون الملكية الفكرية لإدارة الاقتصاد، فإن الأمر يشبه توجيه آلة بروافعَ من الجيلي.»

## (٣-٢) الأجهزة الإلكترونية المفتوحة المصدر

يُعتبر مشروعَا ريب راب وفاب آت هوم مثالَيْن جيدَيْن للأجهزة الإلكترونية التي تُتاح تصميماتها بنحو مجاني. هناك عدد صغير لكنه مُتنامٍ من المبتكرين الذين أصبحوا يتيحون تصميمات أجهزتهم بنحو مجاني؛ مما يحررها من شروط الاستخدام المحددة. وفيما يشبه فلسفة البرمجيات المفتوحة المصدر، فإن حركة الأجهزة الإلكترونية المفتوحة المصدر تُعتبر ردًّا على القيود التي تفرضها قوانين الملكية الفكرية الحالية.

وقتَ كتابة هذا الكتاب، فإن تراخيص الأجهزة الإلكترونية المفتوحة المصدر ما زالت في مهدها، وبتطور الحركة، فإن عدد وتنوع التراخيص المتاحة سيَزيدان على الأرجح. ومثل تراخيص البرمجيات المفتوحة المصدر، فإن تلك التراخيص تتيح للمبتكرين الآخرين استخدام وتعديل تصميمات أي مبتكر آخر. ويسمح بعض التراخيص بالاستخدام التِّجاري للتصميمات المعدلة.

أحد أهداف حركة الأجهزة الإلكترونية المفتوحة المصدر هو صنع نظام صديق للأعمال ونابض بالنشاط؛ حيث يمكن مشاركة تصميمات الأجهزة بالمجان وبأمان لكن بطريقة منظمة بعض الشيء. يمتلك العديد من أنصار نماذج الترخيص الخاصة بالحركة شركةً أو يعملون فيها، وبالنسبة إلى العديدين منهم، فإن الربح يكمن في بيع نسخ محسَّنة من تصميمات مفتوحة المصدر أو عروض خدمية.

نجح عالم البرمجيات في إحداث توازن ناجح بين البرمجيات التِّجارية والبرمجيات المفتوحة المصدر لسنوات. تتيح تراخيص البرمجيات المفتوحة المصدر للقراصنة والمطورين والشركات بديلًا معروفًا ومحددًا لبراءات الاختراع وحقوق النشر والتراخيص التِّجارية التقليدية. في الحقيقة، فإن العديد من الأدوات البرمجية مغطاة بمجموعة متنوعة من تراخيص البرمجيات المفتوحة المصدر.

على العكس، فإن مصممي الأجهزة لديهم خيارات محدودة، فبصورة عامة، فإن براءات الاختراع مقبولة؛ لكن ليس كل المخترعين والشركات الصغيرة الذين يصممون لوحات الدوائر الإلكترونية أو الأجهزة يريدون التكاليف والتعقيدات القانونية التي تصاحب عملية تسجيل براءة الاختراع، كما أنهم لا يرغبون تحديدًا في الحصول على الحق القانوني الذي يمنع الآخرين من استخدام ابتكارهم.

إذا اختار المخترعون أن يجعلوا تصميم الأجهزة الإلكترونية خاصتهم مفتوح المصدر، فإنهم يتيحون للجميع كل المخططات (أي الوصف التفصيلي للأجزاء والبرمجيات

والرسومات وملفات «اللوحة» الضرورية)، وهي المعلومات الأساسية التي سيحتاج إليها أي شخص لإعادة صنع نسخة طبق الأصل من المنتج أو الجسم. وتُتاح هذه المعلومات المنشورة بموجِب ترخيص يحدِّد الاستخدام المقبول.

يمكن للأجهزة مفتوحة المصدر أن تمتلك روح مخاطرة إذا أراد المخترعون ذلك؛ فبمجرد أن يصبح المخطط الأصلي للتصميم مفتوح المصدر، يتحول إلى ما يُعرف باسم «الابتكار السابق». الابتكار السابق هو المعلومات التقنية التي نُشرت من قبلُ عن ابتكار ما، وهو ما يجعل من الصعب لغير المبتكرين ادِّعاء مِلكيتهم للفكرة والحصول على براءة اختراع لها.

إن مجموعة التراخيص التي وضعتْها حركة الأجهزة الإلكترونية المفتوحة المصدر ما زالت في مهدها وليست في مرحلة ناضجة كما هو الحال مع البرمجيات المفتوحة المصدر. على الرغم من ذلك، فإن استخدام الأجهزة المفتوحة المصدر آخذ في التزايد بفضل مجتمع المجال المتحمس، والرؤية والجرأة لشابتين، وهما أليشا جيب وآية بدير. في مجتمع مجال يزيد فيه عدد الرجال عن النساء، فإن أليشا وآية تبرزان كقائدتَيْن واختصاصيتَيْ تقنية ورائدتَيْ أعمال.

في مقابلة مع مجلة «ميك»، وصفت أليشا حركة الأجهزة الإلكترونية المفتوحة المصدر كحافز للابتكار التقني قائلةً:

> أعتقد أن الأجهزة المفتوحة المصدر هي نظام براءات الاختراع الخاص بالقرن الحادي والعشرين … كما أنها لا تتعلق بجعل الابتكار أمرًا مفتوح المصدر فقط لكنها كذلك تحرره؛ لكنها لا تأتي مصحوبة بعشرين عامًا من الحقوق الحصرية. الفائدة هي أن هناك مجتمعًا كاملًا يضيف إلى تصميماتك ويبتكر ويشارك أعماله الداعمة لمنتجك. إنها تدفع المصمم الأصلي لصنع منتج أفضل والاستمرار في تطويره، بدلًا من حبسه في حالة ركود لمدة عشرين عامًا.[9]

ربما لا تكون الأجهزة المفتوحة المصدر هي الحل لكل أنواع الابتكارات، لكن فلسفتها تصلح بنحو كبير للمنتجات المعقدة نسبيًّا؛ مثل البرمجيات والإلكترونيات، حيث ما زالت خبرة الصانع الأصلي أمرًا مطلوبًا بعد إتاحة مخططاتها الأصلية. إن قليلًا من الناس يمكنهم تطوير الخوارزميات أو الدوائر الإلكترونية المعقدة، المصممة من قِبَل شخص آخر؛ لذا فإن المصمم الأصلي عادةً ما يظل متحكمًا في المشروع حتى بعد إطلاقه.

على الرغم من ذلك، فإن الابتكار البسيط يُنسخ ويُنسى صانعُه الأصلي بسهولة، ومن المحتمل أن صانعه لن يقدِر على الاستفادة من إضافة قيمة إليه إذا لم تكن هناك حاجة لخدماته كخبير؛ وهذا صحيح، خاصةً بالنسبة إلى الابتكارات البسيطة الرائعة التي يُدرَك كُنهها بعد فترة بسيطة. أتساءل هل كان هذا السبب في أن بعض المدافعين الصريحين عن تراخيص الأجهزة المفتوحة المصدر هم مطورو برمجيات وأشخاص يبتكرون أجهزة إلكترونية معقدة، لكن الناس الذين يبتكرون وصفة جديدة لمادةٍ ما أو جهازًا ميكانيكيًّا جديدًا، غالبًا ما يستمرون في الاعتماد على براءات الاختراع.

## (٣-٣) براءات الاختراع المتناهية الصغر

بتطور الطباعة الثلاثية الأبعاد، فإن تراخيص الأجهزة المفتوحة ربما تكون بديلًا جيدًا لقوانين الملكية الفكرية وإدارة الحقوق الرقمية. تتمثل احتمالية أخرى في تهيئة نظام الملكية الفكرية الحالي ليصبح أكثر ودية للشركات الصغيرة والمبتكرين الأفراد. ضع في الاعتبار أنه في الدول ذات الدخول المنخفضة، تمنح القروض المتناهية الصغر الأفراد الفرصة لإنشاء شركات صغيرة. وفي عملية تطوير المنتجات الجديدة، يمكن لبراءات الاختراع المتناهية الصغر المساواة في مسألة براءات الاختراع بين الشركات الكبيرة والصغيرة.

وفيما يشبه براءة التصميم أو المنفعة العادية، فإن براءة الاختراع المتناهية الصغر ستصدر رسميًّا من هيئة تسجيل براءات اختراع حكومية. وعلى الرغم من ذلك، فإنها ستكون وحدة خاصة بالملكية الفكرية أصغر من براءة الاختراع الكاملة؛ ولذا ستكون أقل تكلفة وأسرع في الإصدار. وربما يمكن لهيئة تسجيل براءات الاختراع وضع حد إلزامي لمجال البراءة لتصبح مؤهلة لتوصف بأنها براءة اختراع متناهية الصغر.

إليكم كيف سيسير الأمر مع براءات الاختراع المتناهية الصغر. في مقابل بضع مئات من الدولارات، يمكن للمخترع تقديم مستند يصف اختراعه لهيئة حكومية مركزية لبراءات الاختراع المتناهية الصغر. هذا المستند المقدم سيكون محدد الوقت وسيصدر على الفور، وستكون دورة حياة براءة الاختراع المتناهية الصغر أقصر؛ ربما خمس سنوات وليس عشرين. ومثل العلامة التِّجارية، فإن براءة الاختراع هذه ستحمي فقط الأشياء المباعة تِجاريًّا لمنع الاحتيال. ومثل براءة الاختراع الكاملة، فإنها ستغطي التطبيق النافع. ومثل حق النشر، فإنها ستكون سهلة ومباشرة في الحصول عليها.

يرى البعض أن توافر براءات الاختراع المتناهية الصغر سيؤدي إلى اختناق عالم براءات الاختراع وتفتيت فضاء الملكية الفكرية. لكن دورة حياتها ذات الخمس سنوات

ستجعل هذا غير محتمل الحدوث. في الحقيقة، فإن مجال استخدامها المحدود سيسهل للمخترعين الآخرين العمل على اختراعات موازية. وسيجعل شرط وجوب استخدامها تجاريًّا لتظل صالحة من الصعب بالنسبة إلى الشركات استخدام مجموعة كبيرة منها لسد الطريق على منافسيها.

في الحقيقة، إن براءات الاختراع المتناهية الصغر ستحسِّن من النسبة بين الإجراءات القانونية والاستخدام العملي؛ ففي النهاية، يُبذَل الكثير من المجهود في تقييم براءات الاختراع والحصول عليها، لكن معظم براءات المنفعة الصادرة نادرًا ما تُستخدم تِجاريًّا. بالإضافة إلى ذلك، فإن نسبة ٠٫١ بالمائة تقريبًا من براءات الاختراع يُتنازع عليها قضائيًّا، ومن بين هذه النسبة يُلغى نصفها.[10]

على العكس، إذا كانت براءات الاختراع محدودة المجال وسريعة ورخيصة في الحصول عليها، فإن هذا التوجه سيقلل التأكيد على عملية نظر براءة الاختراع، وسيؤكد بدلًا من ذلك على القيمة التِّجارية العملية لحماية الملكية الفكرية؛ فبمجرد أن يُمنح المخترع براءة اختراع متناهية الصغر، فإنه يُمنح فورًا حقًّا حصريًّا ضمنيًّا قصير المدى للفكرة المعلَن عنها. وفقط في حالة وقوع خلاف بين كيانَيْن تِجاريَّيْن عاملَيْن، فإن ادعاءات خرق براءة الاختراع ستُقيَّم بالاختبارات التقليدية للأصالة والمنفعة والابتكار.

## (٣-٤) صنع التوازن الصحيح

إلى أين يتجه كل هذا؟ إذا كانت الحقيقة أغرب من الخيال، فربما يكون أفضل مكان لتوقع ما سيحدث في المستقبل هو في رواية خيال علمي.

في رواية «الصُنَّاع»، يصف كاتب الخيال العلمي، كوري دوكتورو، صورة جذابة لعالم مستقبلي أصبح فيه استخدام الطابعات الثلاثية الأبعاد أمرًا شائعًا. العالم المصوَّر في الرواية يعاني من أزمات؛ فالبطالة مرتفعة، وهناك قطاعات كبيرة من السكان سقطت من الاهتمام العام، وتعيش في مدن من الصفيح بتنظيم ذاتي.

تبدأ الأحداث عندما تتسبب شخصيتان رئيسيتان في الرواية، بيري وليستر، في حدوث ثورة اقتصادية على نطاق صغير عندما يعلِّمون الناس المحليين كيفية تصميم السلع التي يحتاجون إليها وطباعتها بنحو ثلاثي الأبعاد وبيعها. في البداية يسود التفاؤل، وبينما يتعلم المهمشون اقتصاديًّا تصميم وطباعة المنتجات، تنبثق كيانات العمل في جميع أنحاء البلاد والعالم. وهكذا، يحصل الناس على وظائف، ويستعيدون احترامهم لذاتهم.

تستمر القصة، حيث يكسب رواد الأعمال عيشهم من بيع أجسام مخيفة مخصصة ومطبوعة بنحو ثلاثي الأبعاد؛ ففي سوق يومية مفتوحة للبضائع المستعملة والرخيصة في ساحة انتظار كبيرة لأحد متاجر وول مارت، الذي تعرَّض للإفلاس، يبيع هؤلاء أنابيب تدخين مطبوعة ومسدَّسات مرتجَلة الصنع تحمل رَصاصة واحدة وعدسات لاصقة مزخرفة. أما البائعون المراهقون فيبيعون أجسامًا بيولوجية غريبة مطبوعة بنحو ثلاثي الأبعاد معروفة باسم «بايو»؛ على سبيل المثال، سِوار مصنوع من خلايا جذعية للأجنة نمتْ لتصبح كُرات صغيرة من الفراء والعظام والجلد. في هذا العالم المستقبلي، هناك سلعة أخرى تقليدية مطبوعة بنحو حيوي، وهي الزهور الصناعية المطبوعة من جِلد رقيق مصنوع من جِلد الأجنة الذي تم إنماؤه.

في النصف الثاني من الرواية، تبدأ الديستوبيا الاقتصادية؛ فينهار الاقتصاد القائم على الطباعة الثلاثية الأبعاد مع انهيار الأعمال بسبب الانتشار السريع لعمليات التقليد. يصبح للمنتجات الجديدة هامشُ ربح لفترة ضئيلة آخذة في التناقص، قبل أن تقلِّل النسخُ الثلاثية الأبعاد القليلة التكلفة من أرباح السوق. وبحثًا عن مشروعات جديدة مربِحة، تبدأ شركة ديزني سلسلة من الدعاوَى القضائية العنيفة التي تخص الملكية الفكرية، والتي تؤدي في النهاية لشلِّ ما تبقَّى من الاقتصاد.

تثير رواية «الصُنَّاع» مسائل قضائية مثيرة للاهتمام حول عالم مستقبلي ربما لا يكون بعيدًا كثيرًا. إن الجانب الإيجابي الأساسي لتحرير قوة الإنتاج هو أن المحرومين من حقوقهم سيكتسبون تمكينًا شخصيًّا. أما الجانب السلبي لتوافر الكثير من أدوات الإنتاج فهو حدوث الانهيار الاقتصادي؛ فانتشار الأشياء المقلَّدة يسبب تآكل هوامش الربح. أضف إلى ذلك الأثر المدمر لقوانين الملكية الفكرية غير الواقعية التي تحاول فرض الملكية الخاصة للأفكار في عصر يمكن فيه لأي شخص صنع نسخ مطابقة مطبوعة بنحو ثلاثي الأبعاد من أي شيء.

يكمن الحل في صنع أُطُر قانونية واقعية ومتوازنة. وكما يعبِّر مقال بنحو بليغ نشره مركز تقنية النانو المسئولة عن التصنيع الجزيئي: «بعض هذه المخاطر تأتي من قلة التنظيم، والبعض الآخر يأتي من التنظيم الزائد عن الحد. سيكون من الضروري وجود عدة أنواع مختلفة من التنظيم في العديد من المجالات، وسيخلق أي استجابة مبالغ فيها أو غير مدروسة لأي من هذه المخاطر ببساطة أرضًا خصبة لظهور مخاطر أخرى.»[11]

ما زال الإدراك العام للتحديات القانونية للطباعة الثلاثية الأبعاد ضعيفًا؛ فقد بدأنا للتوِّ في استكشاف هذا الجانب الجديد، ولن يمر وقتٌ طويل قبل أن ينتبه القانون لما يحدث.

الفصل الثالث عشر

# تصميم المستقبل

إحدى أشهر الطرق لوصف قوة الطابعة الثلاثية الأبعاد باعتبارها أفضل آلة تصنيع هو مقارنتها بآلة الريبليكيتور من عالم مسلسل «ستار تريك» الشهير. كانت تلك الآلة تتلقى أوامر شفهية وتصنع ما يطلبه طاقم سفينة إنتربرايز أيًّا كان. بمعنًى آخر، فإنها آلة تمتلك القدرة على صنع أي شيء.

## (١) شاي «إيرل جراي» ساخن

عندما شاهدت مسلسل ستار تريك في طفولتي، كان يثير غيظي وحَنَقي أنه لم يقُم أحد باختبار الريبليكيتور. وحلقة تلو الأخرى، وأينما كان يظهر الريبليكيتور، كان كل ما يُطلب منه هو تحضير قدح من شاي إيرل جراي. وربما يتجرأ أحد أفراد السفينة في يوم ما ليطلب قطعة من التشيز كيك. ربما يمكننا عذر قلة خيال السيد سبوك بسبب كونه من جنس الفولكان، لكن زملاءه البشر لا ينقصهم الخيال.

وكشخص ناضج، ألقيت باللَّوْم على كتَّاب سيناريو المسلسل؛ فبتوافر آلة مثل الريبليكتور يمكنها صنع أي شيء، فإن خيالهم لم يصل إلا أن يأمروها بتحضير قدح تقليديٍّ من الشاي. في معملي، نسمِّي هذه الظاهرة «متلازمة إيرل جراي».

يعاني التصميم من أجل الطباعة الثلاثية الأبعاد من هذه المتلازمة، ومثل قدرة الريبليكتور غير المستغلة، فإن الطباعة الثلاثية الأبعاد تمدنا بفضاء تصميم جديد غير مستكشف، لكن خيالنا لا يزال أسير التجارِب السابقة؛ فنحن البشرَ مخلوقاتٌ نقدس

العادة، وأيًّا كان ما نصنعه فهو يُعد امتدادًا لما نألفه بالفعل، ومثلما يقول المثل القديم: «إذا كان كل ما تمتلكه هو مِطْرقة، فإن كل شيء حولك سيبدو كمسامير.»

جزء من المشكلة هو برامج التصميم التي يجب أن نعمل بها. تُعتبر أدوات التصميم بمساعدة الكمبيوتر أدوات مهمة لعملية الطباعة الثلاثية الأبعاد، ومع ذلك فإن برامج التصميم تظل أسيرة للقيود التي تفرضها القدرة الحاسوبية التي كانت غير مؤهلة فيما مضى. بالإضافة إلى ذلك، فإن أدوات التصميم الحالية صُنِعت للعمل في ظل الحدود المادية التي تفرضها آلات التصنيع التقليدية.

للخروج من متلازمة إيرل جراي واستغلال تقنيات الطباعة الثلاثية الأبعاد بأفضل نحو ممكن، نحتاج كبشر إلى بذل المزيد من الجهد، وأن نكون أفضل من كتَّاب سيناريو مسلسل ستار تريك، ففي كوكبنا، وبالقرب من منزلي، أرى متلازمة إيرل جراي تحدث في القاعات الدراسية؛ فجذورها تمتد لعمق كبير.

أُدَرِّس مقرر تصميم إنتاج لطلاب الجامعة. في بداية عملي مع إحدى الفرق الدراسية، طلبت من الطلاب تصميم حامل أقلام رَصاص يمتاز بالعملية والجاذبية، وقلتُ لهم إن تصميماتهم لهذا الحامل ستُطبع بنحو ثلاثي الأبعاد؛ ولذا قضيت بعض الوقت في تعريفهم بإمكانيات التصميم الجديدة المتاحة لهم.

عندما كلفتهم بمشروع تصميم حامل الأقلام الرَّصاص، حَثَثْتُهم على العمل بحرية وانطلاق في تصميماتهم وجعلها «جامحة المظهر» قدر الاستطاعة. قلت لهم — على أمل رؤية تصميمات مثيرة ومُجدِّدة: «فكروا فعليًّا خارجَ الصندوق.»

وبعد تكليفي لهم بالمشروع، رجع طلابي إلى قاعة المحاضرات حاملين تصميماتهم الكاملة، وعندما تجولت في القاعة مُلقيةً نظرة على شاشات أجهزة الكمبيوتر خاصتهم، انهارت آمالي. كانت تصميماتهم معَدة بعناية في الأغلب، ويمكنها البقاء منتصبة، كما كان معظمها قادرًا على حمل الأقلام الجافة والرَّصاص. في الحقيقة سلَّم معظم الطلاب تصميمات جيدة ومتينة يمكنها أن تصبح حاملات مناسبة وصالحة بما يكفي لأقلام الرَّصاص.

بعض الطلاب الجريئين صمموا بعض الزخارف على الأسطح لإضفاء عامل الجاذبية على الحاملات، لكن معظم التصميمات المقدمة كانت تنويعات خجولة على ما هو موجود بالفعل. لم يكن الطلبة الجامعيون هم الوحيدين الذين يعانون من متلازمة إيرل جراي؛ فخارج القاعات الدراسية، لاحظت أنه حتى المصممون المحترفون عادةً ما يتنازلون عن حرية الابتكار التي تتيحها لهم الطابعة الثلاثية الأبعاد.

وصف الفيلسوف والكاتب الكندي، مارشل ماكلوهان، هذا الموقف على نحو ملائم بمقولة شهيرة تقول: «نحن نشكل أدواتنا، لكن أدواتنا تُشكِّلنا لاحقًا.» تساعد مقولة ماكلوهان الرائعة في تفسير قصر النظر التصميمي الذي يميز متلازمة إيرل جراي؛ فمنذ بضعة عقود مضت، صنعنا أدوات تصميمٍ بمساعدة الكمبيوتر التَزمَتْ بقيود التصنيع التي لم تعُد موجودة. مع ذلك، فإن هذه الأدوات تستمر اليوم في تشكيل حياتنا، ولكسر هذا الركود، يجب علينا إعادة تشكيل أدوات التصميم خاصتنا.

بوجه خاص، هناك فرصتان أجدهما واعدتين؛ الأولى هي صنع برامج تصميم سهلة ومرحة في استخدامها. والثانية هي تطوير طريقة «تفكير» الكمبيوتر بشأن الأشكال؛ لأن طريقة تفكيره بشأنها تحدد، إلى حد كبير، إلى أي حد ستدعنا نستكشف الاحتمالات التي تتيحها.

## (٢) دراجة لخيالنا

في مقابلة عام ١٩٩٠ على التلفزيون الحكومي، وصف ستيف جوبز أجهزة الكمبيوتر بأنها «أكثر الأدوات التي اخترعها البشر استثنائية. إنها تُعتبر درَّاجات لعقولنا.» كان جوبز يهدف لإيضاح أنه إذا أتيحت لنا التقنية القادرة على تعزيز قدراتنا الأساسية، فيمكننا زيادة ما هي قادرة على صنعه بنحو جذري. لسوء الحظ، فإن برامج التصميم بالنسبة إلى معظمنا لم تصبح بعدُ دراجات لخيالنا.

تخيَّل هذا السيناريو المستقبلي: طفلة ذات تسعة أعوام تحرِّك يديها في الهواء. وعلى شاشة قريبة يتشكل تصميم ببطء. على أصابع الطفلة ملصقات صغيرة بها مستشعرات تنقل المعلومات لاسلكيًّا لبرنامج التصميم. يتلقى البرنامج بيانات المستشعرات، ويفسر حركات الطفلة بينما تسوي وتختار وتضغط الشكلَ الموضح على الشاشة ليتخذ الشكل المناسب من دون حتى أن تلمس لوحة مفاتيح أو فأرة. يفهم الكمبيوتر ما تنويه، ومثل الحِرْفي الذي يتقن عمله، يجعل التصميم يتخذ شكله النهائي المثالي.

أتمنى لو كانت برامج التصميم سهلةَ الاستخدام هكذا، ولاستغلال قوة تقنيات الطباعة الثلاثية الأبعاد بنحو كامل بالنسبة إلى الجميع، فيجب أن تصبح أدوات التصميم أكثر سهولة في تعلُّمها وأكثر مرحًا في استخدامها وأكثر قدرة. وأحد التوجهات الواعدة هو صنع برامج تصميم تبدو وتعمل كإحدى ألعاب الفيديو.

## (٢-١) تلعيب برامج التصميم بمساعدة الكمبيوتر

منذ شهور مضت، تلقيت رسالة إلكترونية من إريك هينز، أحد مخضرمي تطوير البرمجيات الذي درس رسوم الكمبيوتر كطالب ماجستير وعمل لفترة طويلة في شركة أوتوديسك. ظن إريك أنني ربما أكون مهتمًّا بعالم جديد افتراضي يسمَّى «ماين كرافت». أخبرني إريك قائلًا: «يمكن وصف ماين كرافت على أنه رؤية من ٨ بتات لمستقبل التصميم للطباعة الثلاثية الأبعاد. إن ملايين الناس يلعبون ماين كرافت؛ إنها مكعبات الليجو للناضجين.»

راسلَني إريك بسبب أنه كان يظن أنني ربما أكون مهتمًّا ببرنامج صممه يسمى «ماين وايز».

ماين وايز هو برنامج مفتوح المصدر (ومجاني) يتيح للناس تعديل ثم طباعة الأشياء التي صمموها على ماين كرافت بنحو ثلاثي الأبعاد. طور إريك برنامج ماين وايز عندما أدرك أن العوالم الافتراضية الغنية التي كان الناس يصممونها على الإنترنت في ماين كرافت كانت تنتظر أن تتجسد في هيئة مادية. كتب إريك أكواد ماين وايز في ٤٥ يومًا في وقت فراغه، وأهدى البرنامج للعالم في عشيَّة عيد الميلاد في عام ٢٠١١، ومنذ ذلك الحين، نُزِّل البرنامج أكثر من ٥٠ ألف مرة.

كنتُ متلهفًا لمعرفة المزيد؛ لذا، رتبت لقاءً مع إريك حتى يمكنَه أن يُريني العالم الافتراضي لماين كرافت. أحد أول الأمور التي لاحظتُها في غرفة المعيشة الخاصة بإريك هي الحُلي الصغيرة المطبوعة بنحو ثلاثي الأبعاد والمتناثرة هنا وهناك. أراني إريك نسخة مطبوعة بنحو ثلاثي الأبعاد لقلعة بالإضافة لمنزل حجري رَمادي ضخم وغير مصقول، له سقف من القش الأصفر. قال إريك إن المنزل كان نسخة مطبوعة من قرية في عالم ماين كرافت.

جلسنا أمام شاشة كمبيوتر عريضة، وسجل إريك الدخول باستخدام حسابه على ماين كرافت. قال إريك إن ماين كرافت هي لعبة متعددة اللاعبين؛ يَصنع كلٌّ منهم فيها شخصية، ويصمم العالم الافتراضي خاصته حسب المواصفات التي يودها، وبنقر وإسقاط قِطَع مكعبة من المواد الخام في أماكنَ محددة لها، يصنع اللاعبون عوالمَ خيالية معقدة وغنية بالتفاصيل. في وقت كتابة هذا الكتاب، كان هناك نحو ثمانية ملايين لاعب يلعبون ماين كرافت، وهو ما يساوي تعداد سكان دولة أوروبية صغيرة.

نظرتُ من فوق كتف إريك إلى الشاشة، وهو يتجول بي في عالمه الافتراضي، الذي يسميه «فوكسيليا». قال إريك: «عندما تبدأ، تحصل على حساب، ثم تحصل على عالم

فارغ تمامًا.» كان عالمه في ماين كرافت الذي يشاركه مع بضعة أصدقاءَ آخرين يمتلئ بالمنازل والقلاع وقبة زجاجية عملاقة وحتى بضعة حيوانات مزارع. أراني إريك أحد أكثر تصميماته طموحًا، وهو جندب نحيل. قال إن تصميم سِيقان الجندب الطويلة النحيلة وقَرْنَي استشعاره، بنحو يمكنه الحفاظ على شكله بعد عملية الطباعة الثلاثية الأبعاد، كان تحديًا.

في عالم ماين كرافت، كل حجر بِناءٍ مكعب الشكل يُمثِّل النظير المادي لمتر مكعب واحد. وعكس ألعاب الفيديو المعاصرة التي تبدو مصقولة المظهر ومصنوعة بعناية بحيث تبدو مثل الأفلام، فإن الرسوم في ماين كرافت للوهلة الأولى تبدو فظَّة، بل وبدائية. تُصنع عوالم ماين كرافت من قطع ضخمة مكعبة الشكل من المواد الخام. الأشجار والبيوت والبحيرات والهياكل مبكسلة على نحو كبير. كل سطح مستوٍ يبدو كما لو كان مصنوعًا من بلاطات منفردة.

ما الذي يجعل لُعبة ماين كرافت شهيرة للغاية؟ جزءٌ من جاذبيتها هو الأثر البصري الساحر؛ فالمكونات مكعبة الشكل تمنح لمسة من الغموض للمدن والمباني والعوالم الخيالية التي يبنيها الناس. قال إريك: «في ألعاب الفيديو، ربما تكون الرسوم بجودة أعلى لكنْ لا يمكنك تغيير أو تحريك الأشياء. إن معظم ألعاب الفيديو تفاعلية، لكن لا يمكنك الحصول على مستوى التصميم الذي يمكنك الحصول عليه هنا.»

هذا العالم الخيالي له قواعدُ داخلية صارمة ومتسقة. تفرض اللُّعبة قوانين مادية على اللاعبين حتى تصبح مساحة التصميم خاصتهم مزيجًا من الخيال الممزوج بنظام العالم المادي. ويجب على اللاعبين أن يواجهوا نفس القيود التي يفرضها تعقيد عالم الواقع على عملية البناء. وبما أن أي مشروع تصميم معقد يمكن أن يستغرق الكثير من الوقت، ولتسريع إيقاع اللُّعبة، فإن اليوم فيها يستغرق ٢٠ دقيقة فقط.

أراني إريك عملية تغطية أرضية إحدى محطات القطار بمزيج من البلاط البني والأحمر والأصفر. لصنع البلاط البني، لا يختار اللاعبون فقط اللون البني ويطبقونه على بلاط الأرضية. بدلًا من ذلك، هناك عملية عضوية ومرهِقة لصنع هذا البلاط. يقول إريك: «هذه البلاطات تُلوَّن من صِبْغات خاصة بالصوف. يجب عليك جزُّ شعر الأغنام وجمع الصوف للحصول على هذه الألوان. اللون الوردي نادر للغاية، وكذلك اللون البني. يجب عليك العثور على الكاكاو لصنع البلاط بني اللون.»

أظن أن جزءًا من جاذبية اللعبة يكمن في أن اللاعبين يمكنهم العمل معًا في فِرق في مشروعات بناء ضخمة وصنع إحساس بالمجتمع التقليدي. وفيما يشبه البناء الجماعي

للحظائر، تعاون إريك وأصدقاؤه لبناء رائعة افتراضية عبارة عن محطة قطار. هذه المحطة صُممت على نموذج محطة سانت بانكراس في لندن؛ حيث شارك كل لاعب بالوقت أو المواد الخام أو خبرة التصميم في المشروع. عندما رأيت المحطة، كانت هناك شجرة عيد ميلاد تتلألأ في ركن فناء المحطة، ويبدو أنه لم تُتَحْ للاعبين فرصةُ إزالتها بعد انتهاء عطلة عيد الميلاد.

تقدِّم ماين كرافت نموذجًا جديدًا للتصميم يُسمَّى «تلعيب برامج التصميم بمساعدة الكمبيوتر»؛ ففي مقابل ٢٧ دولارًا، تتيح ماين كرافت للاعبين أدوات تصميم قوية وسهلة الاستخدام، بالإضافة إلى مجتمع افتراضي من الرفاق من اللاعبين والبنَّائين. عندما كنتُ مهندسًا شابًّا، كان تعلُّم استخدام برامج التصميم يشبه تقريبًا تعلُّم كيفية إدارة برج المراقبة في المطارات. كانت تمتلك واجهة استخدام معقدة بنحو مثير للحَيْرة والارتباك، ومفردات خاصة، وكانت تَفوق مهاراتِ المستخدم العاديِّ. لم يكن تعلُّم تلك البرامج مسليًا في أي مرحلة عمرية.

أما ماين كرافت فسهلة الاستخدام للغاية؛ لدرجة أن طفلًا في الثامنة من عمره يمكنه لعبها. في الحقيقة، ومنذ بضعة أشهر، بدأ ابني ذو الثمانية أعوام في لعبها في المنزل. وبعد أيام من اكتساب الخبرة في ممارستها، صمَّم وبنَى لي منزلي الافتراضي (بالقرب من منزله المبنيِّ بجوار إحدى الأشجار)، مكتملًا بسرير وكابينة استحمام.

يبدو أن القيود المادية لماين كرافت تثير خيال ابني؛ فقد قام بعدة تجارِب لاختبار قوة انفجار مادة تي إن تي، مفجرًا فوهات زاوية عملاقة لتتحول إلى تراب وسطح جرف. أخبرني أن بضع دجاجات ماتت عندما كانت تتجول بالصدفة بالقرب من الانفجار، لكن بقرة مارَّة نجت بنحوٍ ما وأخذت تتناول الكَلَأ بعد الانفجار بفترة قصيرة قُرب الفوهة العظيمة.

يكمن داخلَ برنامج ماين كرافت — وهو أمرٌ لا يثير كثيرًا إلا اهتمام القليل من علماء الكمبيوتر — معماريةُ تصميمٍ مثيرة للاهتمام. لا يستخدم البرنامج نماذج التصميم المعيارية لصناعة البرمجيات؛ فالرسوم المكعبة الشكل لا تُصمم بواسطة النمذجة الصلبة التقليدية (وهي أداة التصميم المفضلة لدى المهندسين) أو السطح الشبكي (وهي أداة التصميم التي يُفضِّلها فنانو التحريك والرسامون). تُشكِّل وحدة رقمية تُسمَّى الفوكسل أساس البرنامج. تتحول وحدة الفوكسل الرقمية الفردية بنحو سلس إلى موقع مادي محدد داخل جسم ثلاثي الأبعاد.



مشهد من لُعبة ماين كرافت صممه لي جريجز وتوماس فرنانديز سيرانو. إذا أمعنت النظر فسترى الأخوين ماريو في قبعتين حمراء وخضراء على يسار القبة الرئيسية (الصورة مهداة من لي جريجز (من شركة سوليد أنجل) وتوماس فرنانديز سيرانو (forominecraft.com). المشهد مصنوع ببرنامج تصيير أرنولد المعتمِد على تقنية الإضاءة غير المباشرة).

يَستهلك التصميم القائم على الفوكسلات قدرًا كبيرًا من ذاكرة الكمبيوتر لكنها تثير إعجاب اللاعبين من ناحية المفهوم كوحدة تصميم أو بلاطة رقمية. وطبقًا لإريك، فإن الفوكسلات، رغم بدائية شكلها، تتيح للناس العاديين طريقةً مباشرة وجذابة للتصميم. يقول إريك: «الفوسكل كوحدةٍ هي شيء يمكن للناس الارتباط به بنحو مباشر. ولسنوات بل لعقود، أعمل ببرامج تشكيل الأسطح حيث يمكنك رسم أشكال متعددة الأضلع أو أسطح منحنية. لكنها غير واضحة وغير متوقَّعة. فإذا لم تكن تمتلك التدريب الكافي على كيفية استخدام السطح الشبكي، فسيكون من الصعب استخدامها؛ فهي ليست كما يَظن الناس.»

أراني إريك ابتكارًا جميلًا على ماين كرافت، وهو تصوير جوي فخم لمدينة إسبانية صنعها لي جريجز وتوماس فيرنانديز سيرانو في شركة تصميم رسوم تُسمَّى سوليد أنجل. صمم لي وتوماس داخل عالم ماين كرافت خاصتهما مبنًى ذا قُبة يقع في تقاطع دائري لستة طرق.

هناك عدة مبانٍ أسقفها مصنوعة من الطوب الأحمر تنتشر في المدينة المحيطة بالمبنى المقبَّب، وفي الأفق البعيد يمكنك رؤية مدرج روماني.

وكما يمكن أن ترى في الصورة أعلاه، فإن الصورة الأصلية للمشهد صَورت الأخوين ماريو يتسلقان قمة أحد الأبنية. على الرغم من ذلك، وفي إشارة لتحديات الملكية الفكرية التي تلوح في الأفق، فإن شخصيتَي الأخوين ماريو المحميتين بحقوق النشر أزيلتا من الصورة عندما اختيرت لتظهر على غِلاف مجلة تصميم؛ فقد طلبت المجلة، عندما خافت من ملاحقتها قضائيًّا بدعوى خرقها لحقوق النشر من قبل شركة نينتندو، من لي وتوماس إزالةَ الأخوين ماريو من الصورة تجنبًا لأي مشكلات.

عندما كنت أنا وزملائي نتعلم استخدام برامج التصميم بمساعدة الكمبيوتر في أواخر الثمانينيات، كنا سنهزأ من مدرسنا إذا قال لنا إن أولادنا سيلعبون يومًا ما بأدوات بسيطة للتصميم بمساعدة الكمبيوتر بكل سعادة؛ فلم نكن نمتلك القدرة الحاسوبية في تلك الأيام لصنع عالم افتراضي غني بالتفاصيل، كما لم نمتلك أي طابعة ثلاثية الأبعاد لصنع تصميماتنا.

## (٢-٢) مجمعات المادة

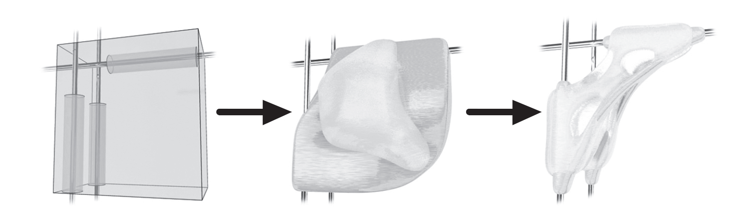
ماذا لو كنت تمتلك نسخة معدلة من آلة الريبليكتور لا تطيع الأوامر الشفوية البسيطة فقط؟ ستكون هذه الآلة أكثر ذكاءً. سأسمي هذا الآلة الذكية «مساعد التصميم الفائق الذكاء». ستخبر هذا المساعد بالمشكلة التي تحاول حلها وليس فقط اسم الجسم الموجود بالفعل الذي تحاول صنع نسخة منه.

إليك مثالًا؛ بدلًا من أمر مساعد التصميم هذا «اصنع كتيفة دعم جديدة لرف الكتب خاصتي»، ستصف له المشكلة قائلًا: «أحتاج إلى كتيفة جديدة لتتحمل وزن مجموعة من الكتب.» بعد ذلك، ستخبر الكمبيوتر بما يجب أن تكون هذه الكتيفة قادرة على فعله، أو تتيح له متطلبات التصميم التي يسميها بعض الناس «مواصفات التصميم». ومثل أي مصمم يتقن عمله، فإن هذا المساعد الآلي سيستمع بعناية إلى طلباتك، وسيأتي بحل يناسب المهام التي يقوم بها.

لتصميم كتيفة الرف خاصتك، ستتذكر شفهيًّا متطلبات التصميم. على سبيل المثال: «هذه الكتيفة مصممة لدعم رف كتب عرضه ٦ أقدام، وسيحمل كتبًا ثقيلة، وسيثبت بحائط رأسي. بالإضافة إلى ذلك، أريد الكتيفة المصممة أن تكون خفيفة الوزن بقدر المستطاع لكنها قادرة على تحمُّل وزن يصل إلى ٥٠ رطلًا على الأقل.» وأخيرًا، ستخبر مساعد التصميم أنك تخطط لطباعة الكتيفة بنحو ثلاثي الأبعاد من البلاستيك الصلب. سيفكر مساعدك بعناية ثم بعد عدة حسابات، سيعرض حل التصميم المقترح من جانبه.

في معملي، صنعنا برنامجًا بناءً على هذا المفهوم. استخدم البرنامج لوغاريتمًا لحساب أفضل تصميم للكتيفة المطبوعة بنحو ثلاثي الأبعاد، ثم أدخلنا متطلبات التصميم وضغطنا على زر الإدخال. أثارت النتائج دهشتنا.

ابتكر الكمبيوتر تصميمًا جديدًا لكتيفة رف الكتب لا يشبه تمامًا الكتائف ذات الزوايا القائمة التي يمكنك شراؤها من أي متجر محلي للمُعَدات. كان تصميمه المقترح عبارة عن كومة متداخلة من المواد الملفوفة حول بضعة تجاويف داخلية جميلة المظهر. لا أظن أنني كنتُ سأفكر في هذا التصميم المتكامل (والمحسَّن) باستخدام أدوات التصميم الحالية. لم يكن من الممكن أن أصنع هذه الكتيفة يدويًّا نظرًا للوزن وقدرات المواد الخام التي أخذها الكمبيوتر في الاعتبار.



يومًا ما سيتم التصميم بمجمعات المواد التي تَبتكر أفضل تركيب لغرض معين ثم تطبعه بنحو ثلاثي الأبعاد، فبداية بقيود الحجم (الشكل الأيسر)، أنتج المجمع الكتيفة المثالية التي لها ثلاثة قضبان (الرسم مهدًى من جوناثان هيلر).

ما الذي سيحدث في المستقبل عندما تتعلم أجهزة الكمبيوتر الذكية رأْب الفجوة بين ما يحتاج إليه البشر وبين ما يمكن للطابعات متعددة المواد القيام به. النتيجة ستكون هي الجيل التالي من برامج التصميم أو ما أحب أن أسميه «مجمع المواد».

هذا المصطلح ابتكره كاتب الخيال العلمي نيل ستيفنسون في روايته «العصر الماسي». في هذه الرواية، تأمر الشخصيات مجمعات المواد بما تريد أن تصنعَه، وفي غُضون لحظة أو اثنتين، يُخرجون منها مرتبة بلاستيكية أو طعامًا أو سلاحًا. لم تكن تلك المجمعات طابعات ثلاثية الأبعاد بالطبع؛ بل كانت تعمل بتقنية النانو، والتي تعيد ترتيب الذرات المتدفقة من مركز تغذية. لم تكن تلك المجمعات تصمم أشياءَ جديدة؛ بل كانت مثل الريبلكيتور في مسلسل ستار تريك حيث كانت مقيدة بصنع نسخ مما هو موجود بالفعل.

الوعد الحقيقي لأي مجمع مواد هو أنه سيجمع بين قوة الذكاء الاصطناعي والطباعة الثلاثية الأبعاد. أولًا: سيستخدم الذكاء الاصطناعي لوغاريتمات من أجل «التجميع» الأوتوماتيكي لمتطلبات البشر عالية المستوى في أفضل تصميم مناسب للطباعة الثلاثية الأبعاد. بعد ذلك، ستصنع الطابعة الثلاثية الأبعاد التصميم بنحوٍ مادي. إن هذه المجمعات، من خلال تجميعها للعنصرين السابقين معًا، ستمكِّننا من تصميم أجسام جديدة لم توجد بعدُ.

ربما يكون من الأفضل مقارنةُ مجمع المواد الذي نتحدث عنه بمجمع البرامج التقليدي. يقوم مجمع البرامج بتحويل لغة كمبيوتر متطورة مثل «سي++» إلى كود بلغة الآلة مُحسَّن للعمل على أنواع معينة من مكونات الكمبيوتر. بعد ذلك، ينفذ معالج مادي هذا الكود. بالمثل، فإن مجمع المواد سيحوِّل المتطلبات عالية المستوى إلى ملف تصميم يستغل أحدث المواد والمميزات التي تميز طابعتك الثلاثية الأبعاد، ثم ستنشئ الطابعة الجسم الموصوف في ملف التصميم الذي أنتجه المجمع.

ربما لا تكون الكتيفة الجدارية هي المثال الأفضل حيث إنها تُعد تحديًا تصميميًّا بسيطًا. ستتضح قوة مجمع المواد الموصل بطابعة ثلاثية الأبعاد إذا كنتَ تحاول تصميم وصنع آلة معقدة. فإذا طُلب مني بعد ٢٠ عامًا تصميم روبوت للرحلة التالية للمريخ، فإليكم كيف أود القيام بالأمر.

أولًا، سأصف الظروف الفريدة الموجودة على سطح المريخ، ثم سأُدخل بعض الأبعاد الإجمالية مثل نطاق الوزن وأي مواد خام ستُستخدم وما إلى ذلك. وأخيرًا، سأحدد مواصفات الأداء: السرعة والثبات والفاعلية وغير ذلك، ثم سأضغط على زر الإدخال، وسأنتظر حتى يأتي مجمع المواد ببعض أفكار التصميم الجديدة. يومًا ما، عندما تصبح هذه المجمعات أدوات تصميم شائعة الاستخدام، ستتم عملية التجرِبة والخطأ المستهلِكة للوقت، والتي تتسم بها مشروعات التصميم المعقدة بنحو سريع للغاية.

## (٢-٣) التطور التفاعلي: استيلاد التصميمات

إن مجمع المواد، مهما بلغت درجة ذكائه، لن يقدِر على قراءة الأفكار. صحيح أنه يمكنه بالفعل ابتكار حلول تصميم رائعة بناءً على ما تخبره بأنك تحتاج إليه، لكنه لا يمكنه تبادل الأفكار معك. ماذا لو كان يمكنك التحاور مع أدوات التصميم خاصتك والعمل معًا عبر عدة تكرارات قبل الوصول للتصميم النهائي؟

إذا كان يمكن للكمبيوتر الإنتاج السريع لأفكار التصميم عبر تكرارات سريعة، فيمكنك اختيار الأفكار التي تروق لك. حينها، يمكن للكمبيوتر «دراسة» اقتراحات التصميم التي اخترتها وصنع تعديلات سريعة عليها ثم عرضها عليك مرة أخرى. ويمكنك مرة أخرى انتقاء خياراتك المفضلة وإعادتها إلى الكمبيوتر الذي سيُجري تعديلات مرة أخرى ويَعرض عليك النتيجة مرة أخرى.

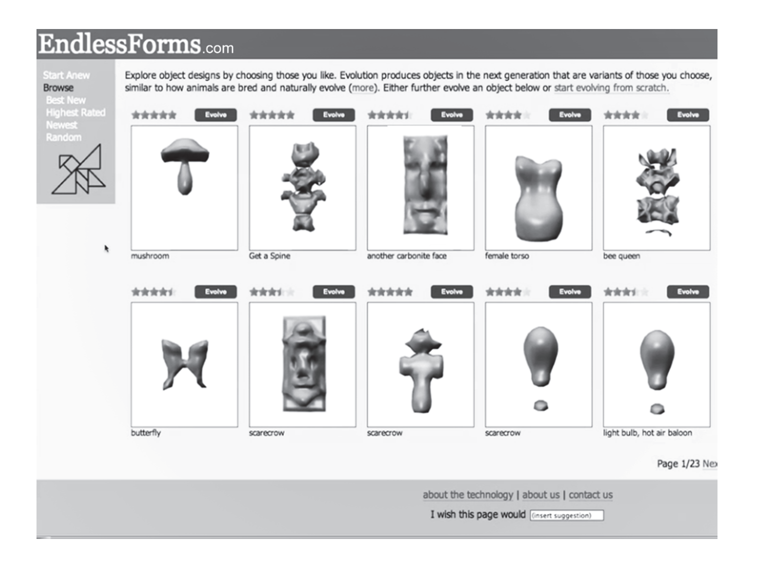
هذه العملية التَّكرارية للتصميم التي يتبادل فيها الكمبيوتر والإنسان الأفكار ذهابًا وعودة تُسمَّى «التصميم التطوري» التفاعلي. ومثل التطور الحيوي، لكن بنحو أسرع بكثير، يمكن للكمبيوتر إعادة تشكيل تصميم باستخدام اللوغاريتمات الرياضية. يكمن جمال التطور التفاعلي في أن المستخدم لا يحتاج إلى معرفة أي شيء عن الجوانب الداخلية لعمل الكمبيوتر. فلا يحتاج إلى معرفة كيفية استخدام برامج التصميم أو كيفية حساب أفضل حلول تصميمية. في الحقيقة، وبنحو يشبه الفنان الذي يتصفح الإنترنت من أجل الإلهام قبل البدء في مشروع جديد، فإن برامج التصميم التفاعلي يمكنها إلهام أفكار جديدة بدفع المصمم لتجرِبة حلول تصميم لم يفكر فيها أي شخص من قبلُ.

صنعنا نموذجًا أوليًّا عاملًا لبرامج التصميم التفاعلي في معملي. صنع طالب سابق، يُدعى جيف كلون، البرنامج. أتاح جيف وفريقُه البرنامج على موقع إلكتروني أسماه «إندليس فورمز» في إشارة لوصف داروين الشهير لعملية التطور البيولوجي.

إليكم طريقة عمل هذا الموقع. يستولد الناسُ الكلاب بالجمع بين كلاب تمتلك سمات محددة يريدون أن تظهر في جِرَائها. يتيح الموقع للمستخدم «استيلاد» التصميمات باختيار تلك التي تروق له. بمعنًى آخر، إنه يعمل كوسيط لعملية سريعة من التبادل في الاتجاهين بين المستخدم وبرنامج التصميم التفاعلي.

تخيلْ أنك كُلِّفت بمشروع تصميم لزجاجة عطر جديدة. أنت لا تعرف كيف تَستخدم برامج التصميم وتُفضل ألا تقيم تصميمك الجديد على مسح ضوئي لزجاجة موجودة بالفعل. بدلًا من ذلك، ستتصفح موقع إندليس فورمز وتختار تصميمك الأول بالنقر على شكل أولي من تشكيلة من التنويعات الأساسية المختلفة المتاحة. واستجابةً لهذا، سيسجل الموقع اختيارك الأول للتصميم، و«يفكر» بشأنه، ثم يقوم ببضعة حسابات سريعة، ثم ستنتج عدة أشكال جديدة تشبه بنحوٍ ما الشكل الأول الذي اخترتَه.

بعد ذلك، ستختار مرة أخرى من هذه المجموعة الجديدة من الأشكال. سيكرر الموقع هذه العملية مسجلًا اختياراتك، وسيُنتج مجموعة جديدة من الأشكال المشابهة لما تبحث




يتيح موقع «إندليس فورمز» للمستخدمين اختيار التصميمات التي تروق لهم وتنقيح هذه التصميمات من خلال عمليات مراجعة متعددة (الرسم مهدًى من جيف كلون وجيسون يوزينسكي).

عنه. في النهاية، وبعد عدة تَكرارات سريعة للعملية ومرات من اختيار الشكل، ستبدأ في رؤية التصميم وهو يظهر للنور. وفي النهاية عندما تشعر أن التصميم المتاح لك هو ما تريد، فيمكنك حفظ التصميم النهائي، وبهذا يكتمل مشروع التصميم خاصتك.

عندما أنشأ جيف وطلابُه موقع إندليس فورمز، أدركوا أنهم يمكنهم مراقبة عملية التصميم الخاصة بالناس بنحو مباشر. عندما يُعطى المستخدم صفحةً فارغة تقريبًا، ويُسمَح له بعمل مجموعة من الاختيارات السريعة، تظهر تصميمات مثيرة للاهتمام. وخلال أشهر قليلة بعد إطلاق الموقع، أنتج المستخدمون أكثر من ثلاثة ملايين جسم غريب الشكل؛ مثل أباجورات على شكل عيش غُراب، وتماثيل صغيرة لإلهة الخصوبة، ومكعبات عليها وجوه مخيفة بارزة.

عندما يستخدم الناس أدوات التصميم التقليدية، فإن الواجهة والسمات تبدو وكأنها تُشكِّل أفكارهم، ربما بجعلهم واعين بذواتهم. على العكس، على موقع إندليس فورمز، فإن المستخدمين «يستولدون» التصميمات بالنقر باندفاع على شكل راقٍ لهم وفعل ذلك مرة

تلو الأخرى. عملية الاختيار السريع ثم الانتظار، ممزوجة بحقيقة أن الكمبيوتر قام بقدر كبير جدًّا من العمل، بدت كما لو أنها أنتجت تعبيرًا جديدًا عن اللاوعي الخاص بالناس.

ربما لا يكون هذا الموقع أفضلَ أداة تصميم لصنع القطع البديلة لمركبة مارس روفر التالية التي ستسير على سطح المريخ؛ فعندما يصنع المستخدمون تصميمًا بالإشارة باندفاع لأشكال جذابة، فإن النتيجة من المحتمل ألا تكون جسمًا مصقولًا ومحسَّنًا رياضيًّا لإعطاء أفضل أداء. بدلًا من ذلك، وكنموذج أولي مبكر لنوع جديد من التواصل بين البشر والكمبيوتر، ربما تكون قيمة مشروع إندليس فورمز في أننا أثبتنا أنه من الممكن للبشر والكمبيوتر القيام بعملية التصميم «بنحو تعاوني».

اتضح أنه من الأسهل بكثير بالنسبة إلى البشر تقييم خيارات التصميمات المقدمة لهم بدلًا من التصميم من البداية، فرغم أنه من غير المرجح أن تستطيعَ تصميم منزل من البداية، يمكنك بسهولة الإشارة إلى ما يروقك وما لا يروقك من تصميمات المنازل. إن المهندس المعماري الجيد هو من سيستمع إليك، ومن خلال كلامك، وبضعة تَكرارات، سينتِج المنزل كما تريد. الناس يستولدون الكلاب منذ قرون من دون فهم لجينات الحيوانات، والمزارعون يستولدون أنواعًا جديدة من الذُّرة قبل فهمهم لجينات النباتات بوقت طويل. يمكننا استيلاد أجسام معقدة من دون فهم كيفية عملها.

يوضح موقع إندليس فورمز كيف تقدِّم أجهزة الكمبيوتر وبرامج التصميم التفاعلي بُعدًا جديدًا للعمل الإبداعي. يصف اثنان من رواد إنتاج الأعمال الفنية بالكمبيوتر، وهما ستيفن تود وويليام لاثام، العملية الفنية بمساعدة الكمبيوتر كعملية تحدث على «مرحلتين: الصنع والبستنة. في البداية، يصنع الفنان أنظمة للعالم الافتراضي، مطبِّقًا أي قواعد مادية وحيوية يختارها مثل الضوء واللون والجاذبية والنمو والتطور، وقواعد أخرى من ابتكاره. بعد ذلك يصبح الفنان بستانيًّا داخل هذا العالم الذي صنعه؛ فيختار ويستولد أشكالًا نحتية مثل مستولد النباتات الذي يُنتج الزهور.»[1]

## (٣) لغة الأشكال

يظل جعل المصممين وأجهزة الكمبيوتر يعملان معًا على نحو مبتكر وسلس أحد أكبر التحديات في التصميم للطباعة الثلاثية الأبعاد. هناك أمرٌ آخر متعلق بهذا أقل وضوحًا لنا، لكنه يظل أمرًا مهمًّا؛ فلاستغلال قدرة الإنتاج الخاصة بالطابعات الثلاثية الأبعاد على نحو أفضل، تحتاج أجهزة الكمبيوتر إلى تحسين كيفية تفكيرها في الأشكال.

يحلل البشر الواقع ويسجلونه، وعادةً ما يفكرون فيه بتحويله إلى لغة مكتوبة ومقروءة. تعكس لغة أي ثقافة قيمها وبيئتها المادية. يستخدم المتحدثون الماهرون تراكيب لغوية معقدة ومفردات هائلة ونابضة بالحياة؛ بينما يربط متحدثون آخرون كلمات بسيطة معًا على نحو غير محكم مما ينتج عنه خليط فظ وهزيل وغير نحوي من الكلمات.

بدلًا من استخدام اللغة، تحلل برامج التصميم الواقع الخارجي وتسجله بالتقاط وتتبع البيانات التي تصف جسمًا ماديًّا. هناك كلمة أكثر اختصاصًا لوصف الطريقة التي تلتقط بها برامج التصميم رقميًّا تفاصيل جسمٍ ما وهي «التصوير الهندسي».

ومثل طفل يتعلم اللغة، فإن برامج التصميم المستقبلية ستصبح تدريجيًّا أكثر إتقانًا في تصوير الأشكال. تعتمد التربية الصحيحة للطفل على تعلُّمه التحدث بنحو سلس بطريقة تناسب الموقف الذي يواجهه. بالمثل، فإن التطور الناجح لأدوات التصميم سيَعتمد على ما إذا كان يمكننا صنع برامج يمكن أن تطوِّر بسرعة ودقة عمليات تمثيل هندسي جديدة استجابةً لمشكلة التصميم التي تواجهها.

بعض اللغات البشرية تمتلك كلمات تصف الحالات العاطفية أو مواقف معينة لا تملكها لغات أخرى. يؤثِّر تعقيد وتوافر الكلمات لأي لغة بشرية على ما يمكن أن يُقال. بالمثل، فإن الطريقة التي تتعامل بها برامج التصميم مع التصوير الهندسي الداخلي تحدد إلى أي مدًى يمكنها معالجة أي تصميم.

معظم برامج التصميم اليوم تتحدث نوعًا بسيطًا من اللغة، وتفكر مثل مخطط عمل تقليدي من الورق. تتحدث البرامج لهجة بسيطة أولية مكونة من كلمات غير معقدة. على سبيل المثال، فإن برامج التصميم بها كلمتان تصفان وجود أو غياب مادةٍ ما في أي تصميم: «يوجد» أو «لا يوجد». فلا مكان للغموض. ولا توجد أي طريقة لوصف نمو جسم مادي أو تغيُّره أو تكيُّفه المشروط. ومثل أي متحدث للغة ليست لغته الأم أو طفل يتعلم أولى كلماته، فإن برامج التصميم تعرض ببساطة وصراحة التفاصيل الموجودة لشكل ومواد التصميم.

وإلى أن يمكن لبرامج التصميم التحدث بنحو أكثر طلاقة لا يمكننا استغلال قوة الطباعة الثلاثية الأبعاد بنحو كامل. هناك طرق بسيطة يفكر بها الكمبيوتر في الأشكال وهناك طرق أكثر تعقيدًا. إذا تحتم عليَّ وضع ترتيب لأساليب التصميم من الأبسط إلى الأكثر تكيفًا وسلاسة، سأرتبها كما يلي.

أبسط عمليات التصوير الهندسي ستكون المخططات الأولية الورقية أو نماذج السطح الشبكي أو النماذج الصلبة. هذه الأفكار التصميمية تصف شكلًا ثابتًا وبسيطًا، وهي تساوي التحدث ببضع كلمات وصفية بسيطة.

بعد ذلك، تأتي برامج التصميم التي يمكنها التعامل مع التصميمات البارامترية، وهي تُعد أكثر تكيفًا بعض الشيء. هذه البرامج تتيح للمستخدم تحديد الأشكال الهندسية القابلة للتعميم التي يمكن أن تتغير طبقًا لبضعة معاملات. على سبيل المثال، فإن مجموعة الأشكال التي تشبه المطارق يمكن وصفها جميعًا باستخدام شكل هندسي وحيد بأطوال ونطاقات عرض مختلفة للمقابض.

بعد هذه المرحلة، ننتقل إلى عالم المستقبل. الأنواع التالية من لغات التصميم تُعتبر تجريبية بنحو كبير، وتوجد غالبًا في معامل الأبحاث والتجارب التصميمية الحديثة الأخرى. في أحد الأساليب الذي يُسمَّى «التصميم كالبرمجة» يصف الكمبيوتر شكلًا ما كتتابع من الخطوات بترتيب محدد، تقريبًا مثل وصف كعكة من خلال سرد وصفتها وليس بشكلها النهائي.

يلي ذلك أسلوب أكثر تعقيدًا يتيحه ما نسميه «الأنظمة التوليدية». مثل هذه الأنظمة «تنمي» حرفيًّا شكلًا من حبة، طبقًا لمجموعة محددة من القواعد.

وأخيرًا، فإن أكثر عمليات تصوير التصميم المستقبلية تعقيدًا وطلاقةً ستكون «المخططات التفاعلية»، وهي تصميمات تعدِّل من نفسها لتتلاءم مع الظروف التي ستستخدم فيها. ومثل خطيب مُفوَّه يرتجل على المِنَصة حسب مزاج وأسئلة الجمهور، فإن برنامج المخططات التفاعلية الإلكترونية يتميز بالديناميكية.

يُمثِّل النظام الأخير كيفية عمل الطبيعة. لا يحدد الحَمض النووي الشكل النهائي للنبْتة بوضوح. إنه يضع مجموعة من القواعد التي ستحكم كيفية نمو النبتة استجابةً لأي ظرف خاص ربما تقع فيه.

قبل ظهور الطابعات الثلاثية الأبعاد، كانت الأفكار المعقدة بشأن تصوير أي شكل وقودًا للخيال والرياضيات النظرية ورسوم الكمبيوتر. كانت الطبيعة هي فقط من يمتلك القدرة التصنيعية على إنتاج الأشكال المعقدة التي تصفها المخططات التوليدية بنحوٍ مادي، وبتطور الطباعة الثلاثية الأبعاد، فإن هذه المفاهيم الجديدة للتصميم ستكون في النهاية قادرة على الخروج من العالم الافتراضي إلى العالم المادي.

## (٣-١) التصميم كوصفة

ربما تكون الوصفات طريقة مناسبة في التفكير في برامج التصميم المستقبلية. لا تصف وصفة أي كعكة تفاصيل شكل وتكوين المنتج النهائي. بدلًا من ذلك، فهي تصف عملية صناعة الكعكة على هيئة خطوات متتابعة أو إجراء أو إذا نُفذت بإتقان سينتج الناتج المرغوب به.

يمكن أن تؤديَ إحدى الوصفات السهلة نسبيًّا إلى ناتج معقد إلى حد ما. انثر شرائح التفاح والزبيب على عجين منتفخ ثم لُفَّها واخبزها وستمتلك استرودل التفاح. تَتابُع الخطوات المذكور في الوصفة أبسط بكثير من الوصف الشفوي الذي يسرد الشكل الهندسي الدقيق للاسترودل ومظهره الخارجي وتركيبه المادي. مع ذلك، فإن الوصفة تصنع شيئًا أعقد بكثير مما توحي به بساطتها. بمعنًى آخر، الكل أكبر من مجموع أجزائه.

ما يعادل طريقة وصفة الاسترودل في برامج التصميم هو أسلوب يُسمَّى «البرمجة الهندسية» أو «التصوير الوظيفي». تتطلب البرمجة الهندسية نوعًا مختلفًا من التفكير ونوعًا مختلفًا من الخيال ونوعًا مختلفًا من المصممين. الأجسام الناتجة تكون أكثر تعقيدًا بكثير مما يمكن تصميمه بأدوات التصميم التقليدية التي تعتمد على الإشارة والنقر.

في البرمجة الهندسية، من السهل وصف أشكال مكررة وتركيبات شبه دورية تختلف قليلًا فيما بينها لكنها متشابهة في الغالب. والتركيبات الهرمية التي تتكون من تركيبات فرعية أصغر يمكن وصفها أيضًا.

لهذا السبب، تتيح البرمجة الهندسية كفاءة وفاعلية كبيرة للمصمم البشري عند تصميم أنماط معقدة أو مصنوعة من أجزاء كثيرة صغيرة. على سبيل المثال، تخيَّل أنه يجب عليك تصميم بدلة من الزَّرَد مصنوعة من شبكة دقيقة للغاية بالإشارة والنقر على ملايين الحلقات المتناهية الصغر. في برامج التصميم بمساعدة الكمبيوتر التقليدية، سيكون هذا مَهمة شاقة ومضيِّعة للوقت.

لكن إذا كنت تستخدم برنامجًا هندسيًّا، فإن هذه المَهمة ستكون سهلة. ستكتب بكل بساطة «وصفة» كما يلي: اصنع حلقةً بقُطر يساوي ثلاثة ملِّيمترات وسُمك نصف ملِّيمتر. بعد ذلك، انسخ الحلقة ألف مرة في صف متشابك. ثالثًا، انسخ الصف ألف مرة بنحو رأسي لصنع البدلة. ثم اضغط على زر الإدخال، وسيتبع برنامج التصميم الوصفة لصنع البدلة.

إذا كان يجب أن يقل وزن أو كثافة النسيج قليلًا، فيمكنك تعديل الوصفة بكل بساطة. هذه المرة ستخبر جهاز الكمبيوتر وهو يكرر كل صف، أن الصف التالي من

الشبكة يجب أن يكون أصغر بنسبة واحد بالمائة في الحجم من الصف السابق. يمكنك تحديد أن يقومَ بهذا لألفَيْ صف، ثم يزداد حجم كل حلقة في الشبكة ببطء مرة أخرى بنسبة ربما تكون ٠,٥ بالمائة. يمكنك حتى تغيير مزيج البلاستيك أثناءَ عملية التصميم.

## (٣-٢) التصميم التوليدي

يأخذ التصميم التوليدي فكرة الوصفة خطوة أخرى للأمام، فبدلًا من سيناريو مكثف، يستخدم التصميم التوليدي شكلًا كنواة ومجموعة من القواعد تحدد كيف يجب أن يتطور هذا الشكل، أو يتكشف، بمرور الوقت. على سبيل المثال، لتنمية شكل معقد يشبه الشجرة، ستبدأ بنواة بسيطة، وهي شكل أسطواني رأسي بسيط مربوط بقاعدة مسطحة. بعد ذلك، يمكنك تحديد قاعدة واحدة، وهي ربط شكلين أسطوانيين آخرين أصغر في الحجم من الشكل الأصلي بنسبة ١٠ بالمائة على شكل حرف Y في كل نهاية حرة من كل أسطوانة. سيؤدي تطبيق هاتين القاعدتين بنحو تَكراري إلى إنماء الأسطوانة النواة لشكل كبير يشبه الشجرة.

بدأت أنظمة التصميم التوليدي الآن في الازدهار تِجاريًّا لكن معظم هذا العمل يقوم به مصممون محترفون من أجل مشروعات خاصة. تُسمَّى برامج التصميم التوليدي أحيانًا «قواعد الشكل»، والتي عندما تُطبع نتائجها تؤدي إلى إنتاج أشكال معقدة ثلاثية الأبعاد.

يمكن استخدام الأنظمة التوليدية مع مجموعة مختلفة من القواعد، وعمليات وأشكال أساسية مختلفة، وتركيب مختلف، وما إلى ذلك. بعض الناس يجربون مجموعة من القواعد الثابتة، بينما يستخدم آخرون قواعد شرطية تعتمد على الحالة الحالية للشكل. على سبيل المثال، ربما تحدد قاعدة أن تُقسِّم الأسطوانة لأسطوانات أصغر فقط في حالة إن كان قُطر الأسطوانة أكبر من خمسة ملِّيمترات. هناك عامل متغير واحد سُمي تيمنًا باسم عالِم الأحياء، أريستيد ليندناير، وهو عبارة عن مجموعة قواعد مشهورة بقدرتها على توليد أشكال وأجسام تشبه النباتات، والتي غالبًا ما تُستخدم لتوليد مشاهد رسومية طبيعية خصبة منتجة بالكمبيوتر في الأفلام وألعاب الفيديو. (أنت لا تظن أن هناك فنانًا يرسم كل شجرة، أليس كذلك؟)

يمكن لبرامج التصميم التوليدي التعامل مع القواعد شبه العشوائية التي ربما تؤدي أو لا تؤدي إلى تغيير الشكل بناء على الصدفة، أو ربما تؤدي إلى نتائج مختلفة طبقًا



يمكن استخدام التصميمات التوليدية لتصميم أجسام بشكل ومظهر أكثر طبيعية (الصورة مهداة من شركة نيرفس سيستم).

لاحتمالية محددة سلفًا. مثل هذه القواعد شبه العشوائية تعمل على أن تبدوَ كل شجرة في المشهد كشجرة حقيقية، لكن في الوقت ذاته تبدو كلٌّ منها مختلفة عن الأخرى بنحو طفيف. ويمكن إنتاج عدد لا نهائي من الصور التوليدية، وتصبح الأشكال غنية أكثر بالتفاصيل وأكثر تعقيدًا، وذلك بنحو يشبه ما يحدث في علم الأحياء.

تُعتبر صور علم الأحياء توليدية؛ فلا يحدِّد الحَمض النووي الخاص بكل منا أين ستكون كل خلية؟ وماذا ستفعل؟ وكيف ستتواصل كل خلية عصبية في أدمغتنا؟ وكذلك فإن الحَمض النووي ليس نصًّا برمجيًّا مكتوبًا يُنتِج جسمًا إذا نُفِّذ، لكن تحتوي شَفرة الحَمض النووي على مجموعة قواعد تُطبَّق بنحو متكرر على أول خلية تناسلية حتى يَنتُج جسد كامل.

## (٣-٣) المخططات التفاعلية

أكثر أشكال اللغة تعقيدًا للتعامل مع وصف الأشكال هي تلك التي تتسم بالديناميكية والتفاعلية. أسمي هذا النوع من عملية التصميم «المخططات التفاعلية». تمكن هذه المخططات المصمم من أَتْمتة عملية إنتاج الأشكال المعقدة التي ستتأقلم «في الزمن الفعلي» مع بيئتها التي تكون مواصفاتها غير معلومة للمصممين.



يومًا ما، ستصمم المخططات التفاعلية منازل بأشكال مثالية لبيئتها (مشروع «ديجيتال فيرناكيولار» الخاص بشانكارا إس كوثابورام ومي لينج لين ولينج هان وجايوي سونج، وهو جزء من استديو التصميم «ماشينيك كنترول» بقيادة مارتا ماليه ألاماني، ويدرسه يرون فان أمجيد في كلية الرابطة المعمارية للهندسة المعمارية ومعمل البحث التصميمي).

لا تؤدي المخططات التفاعلية مهامَّ بسيطة؛ على سبيل المثال، فإنك لن تستخدم هذه المخططات لطباعة مقبض بديل لغسالتك في المنزل بنحو ثلاثي الأبعاد. بدلًا من ذلك، ستطبق هذه المخططات في مشروعات تصميم تكون البيئة فيها مجهولة وحتى متغيرة.

يمكن لأي مخطط تفاعلي إرشاد طابعة خرسانة ضخمة تطبع منزلًا يحتاج إلى التكيف مع طبيعة أرض غير معروفة بعدُ، أو جسرًا يحتاج إلى التكيف مع ظروف الرياح، أو أباجورة تحتاج لتعويض ظروف إضاءة محيطية معينة. ويمكن للمخطط التفاعلي أن يكون مثاليًّا في غرف الجراحة. وربما يومًا ما تَصنع الطابعاتُ الثلاثية الأبعاد في موقع الحدث نسيجًا حيويًّا داخل الجسم البشري يتكيف مع الظروف الفريدة لكل جسم.

ستحتاج برامج التصميم التي تنفذ المخطط التفاعلي أولًا إلى مسح البيئة المستهدفة، وستحتاج كذلك إلى أن تكون قادرة على «محاكاة» تلك البيئة بدقة عالية لمعرفة أي القواعد بالضبط ستُستخدم ومتى. باستخدام هذه المعلومات، ستقدِر على «إنماء» الشكل المناسب لهذه البيئة المحددة، وهذا الشكل سيُصنع بعد ذلك بطابعة ثلاثية الأبعاد.

عندما يحضر أي مصمم طابعة ثلاثية الأبعاد لطباعة مخططات تفاعلية، سيكون من المستحيل مقدمًا على وجه الدقة معرفة كيف سيخرج التصميم النهائي وكيف سيبدو. ستختلف الاستجابة حسب كل موقف؛ مما سيغيِّر التفاصيل الخاصة بالتصميم النهائي. في الطبيعة، على سبيل المثال، فإن النباتات عادةً ما تنمو مائلة نحو مصدر للضوء، لكن بعد فترة من النمو ستتوقف عند ارتفاع معين بسبب الضغط الداخلي الذي يولده وزنها الزائد. إذا أتيحت لك القدرة على تصميم عملية نمو نبتة ما، فيمكنك وضع القواعد التي تسمح للنبتة بالمزيد من النمو عندما تتعرض لمصدر ضوء خارجي. يمكنك التحكم في هذا النمو بقواعد قائمة على مستشعرات بالضغط تتحكم في نمو النبتة حتى لا يزيدَ ارتفاعها وتتسبب في حدوث حمل داخلي كبير جدًّا.

إذا طُبقت هاتان القاعدتان — الداخلية والخارجية — معًا على النباتات في ظروف مختلفة، فسيؤدي هذا إلى نمو نباتات بأطوال وأشكال مختلفة. وحتى إذا كانت هناك نبتتان بنفس مجموعة القواعد، ووضعت إحداهما في ضوء ساطع والأخرى في ضوء خافت، فسينتهي بهما الحال بشكل مختلف؛ بسبب الاستجابة المختلفة لمستشعِرات كل نبتة، ورد الفعل المختلف الذي أحدثته تلك الاستجابة بسبب القاعدتين.

## (٣-٤) تصميم أباجورة واحد، وأباجورات عدة مخصصة

كيف يمكن لمصممي المستقبل تطبيق نظم تفاعلية على عملية تصميم المنتجات؟ تخيَّل مخططًا تفاعليًّا لأباجورة. سيُحدَّد شكل تلك الأباجورة باستخدام مجموعة من القواعد التي ستُطبق على «شكل بدائي» بسيط لتطوير التصميم النهائي للأباجورة. ستضع الأباجورة في أحد أركان «غرفة» افتراضية بجانب «نافذة» افتراضية داخل محاكاة بالكمبيوتر. سيحسب البرنامج الاستجابة للضوء المتاح بجانب النافذة الافتراضية مما سيقود التصميم إلى شكل محدد.

إذا وُضعت الأباجورة في غرفة افتراضية مختلفة بجانب مصدر ضوء ثابت، فسيتطور تصميم الأباجورة ليصبح شكلًا جديدًا. وبتطبيق الإشارات البيئية التي يحاكيها الكمبيوتر

على عملية التصميم، فإن المخططات التفاعلية تحدد المنتج ليس بوصف شكل مرغوب به، لكن بتركه يتشكل استجابة للبيانات.

يمكن أن يؤديَ تصميم إحدى الأباجورات إلى العديد من التصميمات المخصصة الأخرى، التي كلٌّ منها متكيف مع استخدامه الخاص لكن كلها أباجورات، مثل الأشجار الفردية في غابة. فإذا كنت تمتلك هذا المخطط التفاعلي للأباجورة، فيمكنك إنتاج تصميم مختلف للأباجورة لكل غرفة في منزلك، بشرط أنه يمكنك محاكاة ظروف الإضاءة بنحو دقيق في منزلك بواسطة برنامج التصميم خاصتك.

## (٣-٥) طابعات تفكر

لأخذ فكرة المخططات الديناميكية إلى بُعد آخر، يمكن أن تُغذيَ الطابعة الثلاثية الأبعاد ببيانات الاستجابة مباشرةً؛ ليس من محاكاة بالكمبيوتر، ولكن من الواقع. تخيَّل طابعة ثلاثية الأبعاد ستمتلك القدرة على إدراك ما تحتاج إلى طباعته والتكيف مع ظروف الطباعة. معظم الطابعات الثلاثية الأبعاد تطيع طاعة عمياء فيما يخص تنفيذ التعليمات؛ إذا لا تنظر إن كانت التعليمات ستُنتج الجسم المطلوب أم لا. مثل هذه الأنظمة تُسمَّى «الحلقة المفتوحة».

استكشف دانيال كوهين من جامعة كورنيل فكرة الطابعات الثلاثية الأبعاد التي تراقب ما تُنتجه. حيث صنع طابعة بنظام حلقة مغلقة، وهي طابعة «تراقب» ناتج الطباعة وتضبط نفسها بنحو ديناميكي استجابة للمواقف المختلفة. على سبيل المثال، تطبع طابعة باستخدام مادة ارتشاحية لا تحتفظ بشكلها مثل الشمع في يومٍ حارٍّ، بينما يُطبع الجسم المصنوع من الشمع، فإن المناطق الذائبة ربما تترسب أكثر مما هو متوقع. الطابعة ذات نظام الحلقة المفتوحة ستستمر في الطباعة مما ينتج عنه شكل مشوَّه.

لتصحيح مشكلات كهذه، أضاف دانيال ماسحًا ضوئيًّا لرأس الطباعة في الطابعة الثلاثية الأبعاد. كانت مَهمة الماسح الضوئي الأساسية مراقبة كيف تُطبع الأجسام بنحو دقيق. وبفضل هذا الماسح، كانت طابعة دانيال ذات الحلقة المغلقة قادرةً على التعرف على أي مشكلة في الطابعة مثل ترسب الشمع هذا.

على الرغم من ذلك، فإن التعرف على المشكلات كان مجرد البداية؛ فبصنع برامج قادرة على قراءة نتاج الماسح الضوئي، كانت الطابعة الثلاثية الأبعاد قادرة على الاستجابة للتغيرات في البيئة من حولها؛ فبمراقبة نتائج الطباعة، وتعديل التصميم لتصحيحها وضبط عملية الطباعة في الوقت الفعلي، يمكنك القول إن هذه الطابعة كانت «تتعلم».

تساهم الطباعة المعتمِدة على نظام الحلقة المغلقة بنحو يفوق مجرد مراقبة شكل الجسم المطبوع. إذا بُرمجت هذه الطابعة بنحو صحيح ووُفر لها الإمكانات المناسبة لإيصال الظروف البيئية المحيطة، فيمكنها مراقبة قوة المادة التي تطبع بها وإضافة مواد في حالة الضرورة. إن أي طابعة ذكية تعمل بنظام الحلقة المغلقة يمكنها مراقبة موصلية أو لدونة المادة أثناءَ طباعتها. في الحقيقة، إن أي مادة أو خاصية تركيبية في الجسم النهائي المطبوع يمكن قياسها وتعديلها في الوقت الفعلي يمكن تصنيعها باستخدام طابعة ثلاثية الأبعاد بنظام الحلقة المغلقة قادرة على التكيف باتباع التعليمات من مخطط تفاعلي.

## (٤) تغيير شكل أدوات التصميم

في البداية نحن نشكل أدواتنا، ثم تُشكِّلنا الأدوات فيما بعدُ. يعكس التصميم للطباعة الثلاثية الأبعاد تأثير سنوات من القيود المادية، وهو ما يشبه الطريقة التي تغلَّف وتُباع بها الموسيقى المسجلة. هل تذكرون الألبومات المسجلة على أسطوانات الفينيل؟ كانت الأسطوانة تحوي مجموعة من الأغنيات كلٌّ منها مدتها ثلاث أو أربع دقائق. وبما أن أسطوانة الفينيل كانت محدودة المساحة، فإن كل ألبوم كان مكونًا من حوالي عشرة أغنيات فقط، خمسة على جهة، وخمسة على الجهة الأخرى.

لا يوجد أي أمر معياري يتعلق بالألبومات عندما تفكر فيها؛ فليس هناك نظرية جمالية تتسم بالعمق تحدد أن يصدِر الفنان بنحو دوري وفي وقت واحد مجموعةً من الأغنيات متساوية الطول في الغالب، ويضعها على وحدة تخزين مادية مفردة، لها عنوانٌ ما وغِلاف مزخرف. إن موتسارت بالتأكيد لم يعمل طبقًا لهذا المعيار. مع ذلك، فإنَّ تصوُّرَنا للموسيقى المسجلة ما زالت تشكِّله أسطوانات الفينيل التي بطَل استخدامها منذ عقود.

إن عشاق الموسيقى من سن معينة يفكرون في إطار الألبومات، ويفكر المصممون واضعين في اعتبارهم القيود التي كانت مفروضة فيما مضى فيما يتعلق بالقدرة الحاسوبية المحدودة والقيود المادية لآلات التصنيع.

ستتوسع قدرتنا على تخيُّل الأجسام المادية وطباعتها بنحو ثلاثي الأبعاد، جنبًا إلى جنب مع زيادة قدرة برامج التصميم على التعبير عن الأشكال. ستكون أدوات التصميم في المستقبل سهلة الاستخدام، وسيستجيب بعضها للمس والحركة والظروف البيئية.

وستصبح أجهزة الكمبيوتر أكثر مهارة في رسم الأشكال وذكية بما يكفي لحل مشكلات التصميم التي لا نقدر على حلها.

سيرشد البشرُ استراتيجياتِ التصميم الخاصة بأجهزة الكمبيوتر خاصتهم بتغذيتها بالبيانات أو التخلص من حلول التصميم غير المرغوب فيها واستيلاد أخرى مرغوبة أكثر. وكما كتب سيفام كريش في مدونته «التصميم التوليدي»: «لا يكمن الحل في إنهاء دور المصمم البشري، بل في مساعدته بإدارة القيود والمتطلبات التي تتطور على مدار عملية التصميم.»[2]

في الطباعة الحيوية، على سبيل المثال، ليس هناك برنامج تصميم لأنظمة الأوعية الدموية. يومًا ما سيَستخدم الأطباء برامج التصميم التوليد للتعامل مع هذه المشكلة، وبدلًا من تصميم نظام أوعية دموية معقَّد للكُلى بوصف شكلها الدقيق المتشعب مباشرةً، سيحدِّد الطبيب بعض القواعد الأساسية. بعد ذلك، من أجل «تصميم» شبكة الأوعية الدموية داخل الكِلية، سيستخدم الطبيب برنامج التصميم التوليدي من أجل «إنماء» شبكة معقدة من الأوردة الجديدة. أنتجت الطبيعة مجموعة مدهشة من «التصميمات» المعقدة للنباتات والحيوانات وحتى الأجسام غير الحية مثل البِلَّورات والأنماط الخاصة بالرمال. بدأت الطابعات الثلاثية الأبعاد في السماح لنا بصنع تركيبات معقدة لكن التصميمات ما زالت بعيدة عن متناول أيدينا.

الفصل الرابع عشر

# المرحلة التالية للطباعة الثلاثية الأبعاد

ميَّز البشر أنفسهم عن أسلافهم في عملية التطور بصنع الأدوات. ربما تكون تقنية التصنيع بالإضافة هي الأداة المثلى التي من المحتمل أن تغير وجه الثقافة البشرية للأبد. وبقوة تشبه قوة أمواج التسونامي العاتية غير المتوقعة التي لا تُقاوَم، فإن كل موجة جديدة من أدوات التصميم والإنتاج المحسَّنة تُحدِث موجات عاتية من التغيير الاجتماعي. هذا الكتاب لا يعرض إلا لمحة عن العالم الناشئ الخاص بالأجسام المادية المطبوعة.

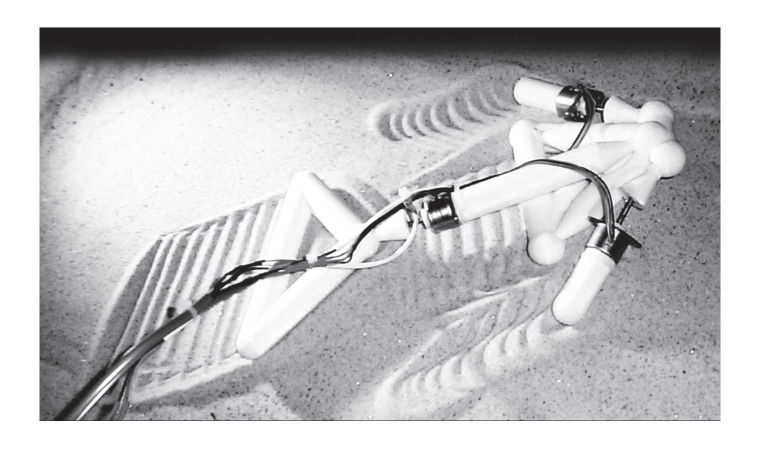
عندما كنتُ أعمل كباحث ما بعد الدكتوراه في جامعة برانديس في مدينة بوسطن بولاية ماساتشوستس، طبعت أنا والأستاذ المشرف عليَّ، جوردان بولاك، روبوتًا كاملًا عاملًا. كان روبوتًا بسيطًا لكن جسده بالكامل كان مصممًا ومطبوعًا بنحو مؤَتْمت. خرج أول روبوت من الطابعة في أواخر عام ١٩٩٩، ثم استغرق الأمر عشرة أشهر حتى يوم صيف في أغسطس من عام ٢٠٠٠ ليحتل الحدث الصفحة الأولى في جريدة «ذا نيويورك تايمز».

كانت لحظةً ممتعة ممزوجة بالألم. في البداية، أوضح لنا محررو الجريدة أن السبب الوحيد في أن هذه القصة ظهرت على الصفحة الأولى أنهم كانوا يبحثون عن أي أخبار للنشر. كان ذلك اليوم — وهو يوم خانق من صيف عام ٢٠٠٠ — أحد أبطأ الأيام المسجلة في تاريخ الصحافة. لم يكن هناك أي خبر آخر نهائيًّا يمكن نشره على الصفحة الأولى؛ ولذا صدر المقال بعنوان «روبوتات تصنع روبوتات».

لكن كانت هناك عاطفة موجودة لا علاقة لها بنشر خبر الابتكار، وهي عدم الرضا؛ عدم الرضا لأن الروبوت لم يُطبع بالكامل بنحو ثلاثي الأبعاد. كان جسده ومفاصله مطبوعة بنحو ثلاثي الأبعاد، وكانت هذه خطوة مثيرة إلى الأمام. لكن معظم

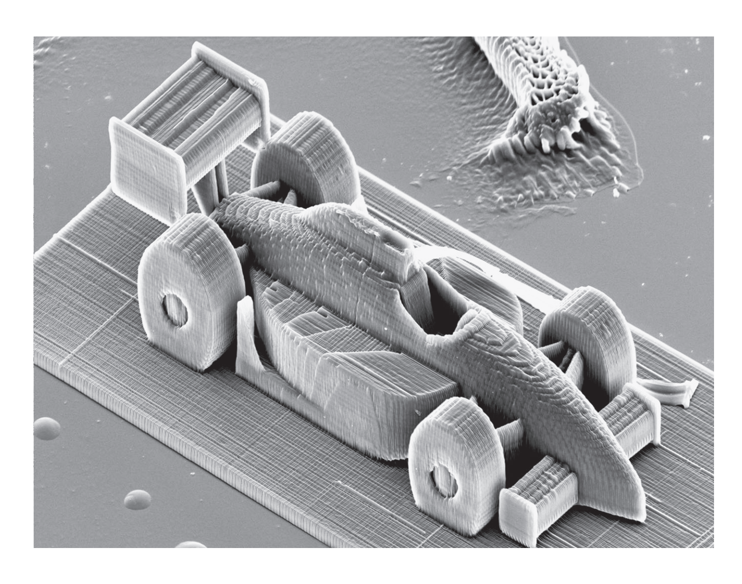
أجزائه الأخرى التي تكوِّن أي روبوت — الأسلاك والبطاريات والمستشعرات والمشغلات الميكانيكية و«الدماغ» — مُجمعة يدويًّا. كان ما يزال هناك طريق طويل قبل أن ننجح حقًّا في طباعة روبوت مكتمل جُمع بالكامل ويحتوي على البطاريات الخاصة به. سيمر وقت ليس بالقصير قبل أن نتمكن من طباعة نظام فعَّال بالكامل، من دون الاحتياج إلى أي تجميع.

عندما يخرج هذا الجيل الجديد من المنتجات من الطابعة الثلاثية الأبعاد، ربما لا تغطي أخباره على أخبار الفضائح السياسية، لكنها ربما تشير إلى موجة تغيير قادمة أكبر.



الروبوت المطبوع المتطور الخاص بمشروع جوليم (٢٠٠٠). كان الجسد الأبيض مصممًا من خلال محاكاة تطورية ثم صُنِع بطابعة ثلاثية الأبعاد، ووضعت الأسلاك والمحركات بنحو يدوي.

يقول كاتب الخيال العلمي، كوري دوكتورو: «أنا من المناصرين للرأي الذي يقول إن كتَّاب الخيال العلمي لا يتنبئون بالمستقبل جيدًا. إننا غالبًا ما نصف الحاضر في ثياب المستقبل.»[1] ما هي ثياب المستقبل بالنسبة إلى تقنيات الطباعة الثلاثية الأبعاد والتصميم؟ سيُتاح لنا عمَّا قريبٍ المزيدُ من الخيارات بالنسبة إلى المواد الخام ودقة طباعة أفضل وعملية تصنيع أسرع وتكاليف آلات أقل. سيكون هناك تطبيقات جديدة وأجسام جديدة مصنوعة غير متوقعة. ماذا بعد ذلك؟



سيارة سباقات بدقة ٢٨٥ ميكرونًا: الطباعة الثلاثية الأبعاد على مقياس متناهي الدقة باستخدام تقنية الطباعة الفراغية (الصورة مهداة من يورجين ستامبفل من جامعة فيينا للتكنولوجيا).

## (١) المراحل الثلاث للطباعة الثلاثية الأبعاد

بدأنا هذا الكتاب بالنظر إلى تطور التصنيع بالإضافة كسلسلة من المراحل التي تحدد التقدم البشري في التحكم في المواد. المرحلة الأولى في هذه السلسلة التي في طريقها للنضج اليوم تتضمن اكتساب تحكم غير مسبوق في «تشكيل» الأجسام. يمكن للطابعات الثلاثية الأبعاد اليوم بالفعل تصنيع أجسام من أي مادة تقريبًا؛ من الزجاج إلى النايلون، ومن الشكولاتة إلى التيتانيوم، ومن الأسمنت إلى الخلايا الحية.

إن القدرة المطلقة على صنع الأشكال لها بالفعل تبعات عميقة تتعدى عملية التصميم الهندسي؛ فالتصنيع الواسع النطاق آخذ في التحول إلى التخصيص الواسع النطاق. في المستقبل، وبتطور تقنيات الطباعة الثلاثية الأبعاد، سيمتلك الجميع القدرة على تصميم وصنع منتجات معقدة التركيب. وستزول العوائق الخاصة بالموارد والمهارات المرتبطة بالتصنيع التقليدي، موفرة الابتكار للجميع ومحررة النشاط البشري.

المرحلة الثانية من الرحلة ما زالت في بداياتها: وتتمثل في التحكم في تكوين المادة؛ تَجاوُز صياغةُ الشكل الهندسيِّ الخارجي لصياغة الهيكل الداخلي من موادَّ جديدةٍ استثنائيةٍ الخواصَّ بدقةٍ غير مسبوقة.

يومًا ما، سنقدر على صنع مواد داخل مواد. عندما تقدِر الطابعات الثلاثية الأبعاد على مزج مواد خام بطرق جديدة، سنشهد ظهور فئات جديدة تمامًا من المواد. ستقضي عمليات تصنيع المواد الخام على القيود التقليدية التي تحدد ضرورة صنع كل جزء من مادة منفصلة ثم يحدث التجميع لاحقًا، وبالطباعة بمواد متعددة، يمكن صناعة مكونات عديدة متشابكة في نفس الوقت ومجمعة سلفًا. وعلى مستوًى أصغر، سنبدأ تضمين ودمج مواد خام متعددة في تركيبات معقدة متناهية الصغر محددة بدقة على مستوى الميكرون.

بهذه الإمكانات، ستقدِر على طباعة مضرب تنس بمواصفات خاصة يَزيد بذكاء من قوة ضربتك الخلفية، أو غضروف بديل مصمم خصوصًا لظهرك الذي يؤلمك (رغم أنه من المحتمل أن يُمنع كلاهما في رياضات المحترفين). رغم اتساع نطاق الإمكانات، فإن القليل فقط من العلماء المتخصصين في دراسة المواد يمكنهم التنبؤ بخواص تلك المواد الجديدة، وقليلٌ من المصممين يمكنهم استغلال فضاء التصميم الجديد. ستكون هناك حاجة إلى أدوات تصميم جديدة لتعزيز الإبداع البشري.

المرحلة الثالثة من هذه الرحلة — التي بدأنا نرى علامات مبكرة منها — هي التحكم في سلوك المادة. في هذه المرحلة سنتجاوز التحكم في شكل المادة، كما هو الحال في المرحلة الأولى، وسنتجاوز التحكم في تكوين المادة، كما هو الحال في المرحلة الثانية. في المرحلة الثالثة سنكتسب القدرة على برمجة المواد لتتصرف بالطرق التي نريدها. سننتقل من طباعة أجزاء ومواد خام سلبية إلى طباعة أنظمة نشطة ومتكاملة يمكنها الاستشعار والاستجابة والحساب والتصرف. سننتقل من التحكم في الوظيفة الميكانيكية لجسم ما إلى التحكم كذلك في كيفية معالجته للمعلومات والطاقة.

عندما يأتي هذا اليوم، سنقدر على طباعة كل شيء (تقريبًا)؛ من الهاتف المحمول حتى روبوت يخرج ماشيًا من الطابعة. لكن مثل أي قصة خيال علمي، هذا ليس كل شيء؛ فالروبوت لن يشبِه بأي حال من الأحوال روبوتات اليوم بسبب أنه لن يخضع لقيود التصنيع التقليدي، ولن يكون مصممًا بواسطة البشر مباشرةً بسبب أن فضاء التصميم الجديد واسع للغاية ولا يقدِر البشر على سَبْر أغواره. ستَفتح القدرةُ على تصنيع نظم نشطة مصنوعة من تركيبات ثانوية سلبية ونشطة في ظل هذه الحريةِ، البابَ لفضاء جديد من التصميمات ونموذج جديد من التصنيع في قوة ما يحدث في الطبيعة.

## (٢) التصنيع بعدة مواد في نفس الوقت

تكمن في قلب المستقبل الأبعد أمدًا لتقنيات الطباعة الثلاثية الأبعادِ القدرةُ على الطباعة باستخدام عدة موادَّ في آنٍ واحد. ذكرنا في فصول سابقة طابعات تطبع عدة مكونات كلٌّ منها مصنوعة من مادة مختلفة. على سبيل المثال، يمكن لرأس طباعة يَطبع البلاستيك الطباعةُ باستخدام البلاستيك الأحمر في يومٍ والأبيض في اليوم التالي، ويمكن لطابعة معادن الطباعةُ بالتيتانيوم الممزوج بالصلب غير القابل للصدأ، ويمكن بالفعل للقدرة على التصنيع بعدة مواد في نفس الوقت التخلصُ من التحديات والقيود للتجميع التقليدي وتمكيننا من صنع أجسام معقدة بنحو متزايد. لكن ما يجعل هذا الشكل من التصنيع مثيرًا حقًّا هو القدرة على الطباعة باستخدام مواد عديدة في نفس الوقت؛ وهو ما يؤدي إلى دمجها معًا لتُنتج موادَّ جديدة معقدة واستثنائية الخواص.

في الأيام الأولى للطابعات الورقية، كان هناك بعض طابعات مصفوفة النقاط التي تمتلك شريطًا رباعي الألوان يمكنه طباعة نقاط بالأحمر أو الأخضر أو الأزرق أو الأسود. على الرغم من ذلك، يمكنك اختيار لون واحد فقط في كل مرة. حتى إنه كان هناك راسمات أقلام يمكنها استخدام ثمانية أقلام بثمانية ألوان مختلفة، لكن كان يجب عليك تحميل الألوان التي تريدها في الراسم مقدمًا، وكل خط يستخدم قلمًا واحدًا فقط.

حدثت النقلة التكنولوجية عندما أصبحت الطابعات قادرة على مزج الألوان الأساسية بنحو فوري بدقة عالية، وبدقة وضوح كبيرة بنحو متزايد. ومثل الانتقال من الطابعة أحادية اللون إلى الطابعة الملونة، أو من تلفزيون أبيض وأسود إلى تلفزيون ملون، فإن إضافة ثلاثة ألوان أساسية فقط تعطي المساحة لظهور ملايين الدرجات من الألوان. ستزيد تعددية ما يمكنك صنعه بطابعة ثلاثية الأبعاد «بنحو مطَّرِد» عدد المواد الأساسية التي يمكن طباعتها ومزجها بنحو متزامن. يرجع هذا إلى أنه يمكنك الطباعة ليس فقط بهذه المواد الأساسية لكن كذلك باستخدام تركيبات من تلك المواد؛ مما يفسح المجال لعدد هائل من المواد الجديدة.

إحدى الشركات الرائدة في استكشاف الطباعة بمواد متعددة هي أوبجيت، وهي شركة إسرائيلية تقع بالقرب من تل أبيب، واندمجت مؤخرًا مع شركة استراتاسيس. زرت مقر أوبجيت لرؤية ما سيأتي في المستقبل. تعمل الشركة، التي تقع في حديقة علمية صاخبة بالقرب من بساتين أشجار البرتقال، على تغيير نظرة الناس إلى المواد الخام. قادني مدير التكنولوجيا التنفيذي في الشركة، إدواردو نابادنيسكي، وكبير علماء المواد،

دانيال ديكوفسكي خلال قاعة الاستقبال المليئة بنماذج تشريحية ونماذج أولية صناعية وألعاب، جميعها مطبوعة باستخدام مواد متعددة.

أوضح إدواردو ودانيال أن الطباعة متعددة المواد لا تتعلق فقط بمزج المواد الخام، بل كذلك بصنع أنواع جديدة تمامًا منها.

عندما يستحوذ الاهتمام بالمواد الجديدة على علماء المواد، عادةً ما يكونون مهتمين بخواص تلك المواد الجديدة مثل الوزن والقوة والمرونة. وغالبًا ما يهتم المهندسون بتركيبات من الخواص؛ مثل مادة تتميز بالخفة والقوة في آنٍ واحد أو المرونة والوضوح البصري. بعض خواص المواد بديهية مثل الكثافة والمرونة، والأخرى أقل بداهة مثل عدد دورات الدفع والجذب التي يمكن للمادة المرور بها قبل أن تنكسر أو إلى أي مدًى يمكنها التمدد قبل أن تنقطع. على سبيل المثال، عندما يصمم المهندسون جَناح طائرة، يجب أخذ دورات الدفع والجذب التي يتعرض هيكل الجَناح بسبب المطبات الهوائية أو الضغط على جسم الطائرة الناتج عن دورات الضغط وتخفيف الضغط، في الاعتبار، وهي خاصية تُعرف باسم حد الإجهاد.

يمكن أن تصبح خواص المواد معقدة في فهمها والتنبؤ بها، ويظل تطوير المواد المناسبة لغرض تصنيعي ما هو الهدف الأسمى لعلوم وهندسة المواد. يمكن للطباعة الثلاثية الأبعاد توسيع نطاق المواد التي يمكن صنعها على نحو كبير. ومع ذلك، فإن المشكلة هي أننا لا ندري أين نبحث وماذا نتوقع.

في أول مرة تَطبع فيها بمواد متعددة، يكون انطباعك البديهي هو أن خواص المواد المختلفة المدمجة ستقع في مكان ما بين خواص المواد الأساسية. من المنطقي أن تعتقد أنك ستحصل، إذا مزجت بين المواد الصلبة واللينة بمقادير متساوية، على مادة نصف صُلبة ونصف لينة. لكن هذا صحيح جزئيًّا فقط؛ فحصيلة المادة الناتجة تعتمد على «كيفية» مزجك للمواد.

على سبيل المثال، إذا طَبعتَ باستخدام مادتين إحداهما لينة والأخرى صُلبة، في نمط يشبه رقعة الشطرنج؛ فستكون النتيجة مادة جديدة بقوة محددة. لكن إذا طبعت بنفس المادتين بنفس القدْر لكن في نمط عشوائي، فستحصل على مادة أكثر قوة؛ فالنمط، وهو الطريقة لمزج المواد المختلفة معًا بواسطة الطابعة، عاملٌ مهم.

إذا دققت النظر في نمط رقعة الشطرنج، على سبيل المثال في تغطية الأرضيات بالبلاط، فيمكنك رؤية الأشكال البيضاء والسوداء القُطرية المرتبة بالتبادل. وبالمثل، عندما تُطبع مادتان على هيئة هذا النمط، فإن السلاسل القُطرية الطويلة التي من المادة اللينة

تصبح «الحلقة الضعيفة»؛ وهو ما يجعل المادة المركبة ضعيفة. لكن عندما تُطبَع مادتان في نمط عشوائي، لا توجد أي حلقة ضعيفة مصفوفة بدقة كهذه؛ ولذا تكون المحصلة النهائية مادة أكثر صلابة.

أدرك العلماء منذ وقت طويل أن ترتيب الذرات على المقياس النانوي في أي مادة يتعلق بخواصها على المقياس العياني. وقبل ذلك بقرون، أدرك أصحاب المهن أن الأنماط العشوائية أقوى من الأنماط القياسية: كان الحدادون يضعون السيوف المعدِنية الساخنة في ماء بارد حتى يبرد المعدِن بسرعة، ويشكل بِلَّورات صغيرة تحوي الكثير من الأنماط الحدودية العشوائية بدلًا من تركه ليبرد ببطء ليصبح حديدًا لينًا مطاوِعًا ذا سطح أملس ناعم. لكن للمرة الأولى، يمكننا «التحكم» في هذه الأنماط بنحو مباشر وصريح؛ ليس على المقياس النانوي بعدُ، لكن على مستوى عياني آخذ في التضاؤل تدريجيًّا.

يمكن أن تصبح خواص المواد حتى أكثر غرابة، فإذا طبعت بعدة مواد بأنماط معينة، فإن خواصها يمكن أن تخرج عن نطاق المواد الأساسية؛ فيمكنك المزج بين المواد القوية والضعيفة بنمط محدد للحصول على مادة مركبة جديدة أكثر صلابة حتى من أي من المادتين الأصليتين. الأمر يشبه نوعًا ما الحصول على مادة تشبه الصُّلب بمزج البلاستيك والخشب، وهما مادتان أقل صلابة من الصلب.

أحد الأمور التي تجعل أي مادة ضعيفة هو أن التشوهات الضئيلة يمكنها أن تتحول إلى شقوق صغيرة، تنمو بعد ذلك وتمتد داخلَ التركيب حتى ينكسر. عندما يمكننا تضمين المادة اللينة بنحو استراتيجي داخلَ مادة هشة، فإن هذه الرقع الترميمية من المادة اللينة يمكنها إيقاف نمو الشقوق؛ مما يؤخر أثرها المأساوي على المادة الصلبة ويجعلها أكثر قساوة. تمتلك أصداف المحار خواصَّ مشابهة مثيرة للاهتمام، لكن حتى وقت قريب، كان صنع هذه المواد من اختصاص الطبيعة فقط؛ فنحن لا نقدر بالتأكيد على صنع مواد كهذه بالقولبة بالحقن، لكن عن طريق الطباعة بمواد متعددة، ربما نقدر على تصنيعها متى أردنا.

إليكم مثالًا آخر لكنه يتعلق بمرونة المواد وكيف تنثني وتمتد تحت الحِمل. إذا قمت قبل ذلك بمط شريط مطاطي، فستلاحظ أنه يطول، لكنه كذلك يصبح أرفع. يحدث هذا مع معظم المواد، وهو ما يعرف باسم «أثر بواسون»، على اسم عالم الرياضيات والفيزياء الفرنسي سيميون دوني بواسون الذي ميَّز هذا لأول مرة بنحو منهجي. لكن من الممكن الطباعة بمواد صُلبة ولينة في نمط يتسبب في «تمدد» المادة فعليًّا عندما تتعرض للشد

والمط طوليًّا. هذه الخاصية الغريبة غير الطبيعية هي لمادة تمتلك نسبةَ بواسون سالبةً، أو ما يُعرف أيضًا باسم المادة «الأوكستكية».

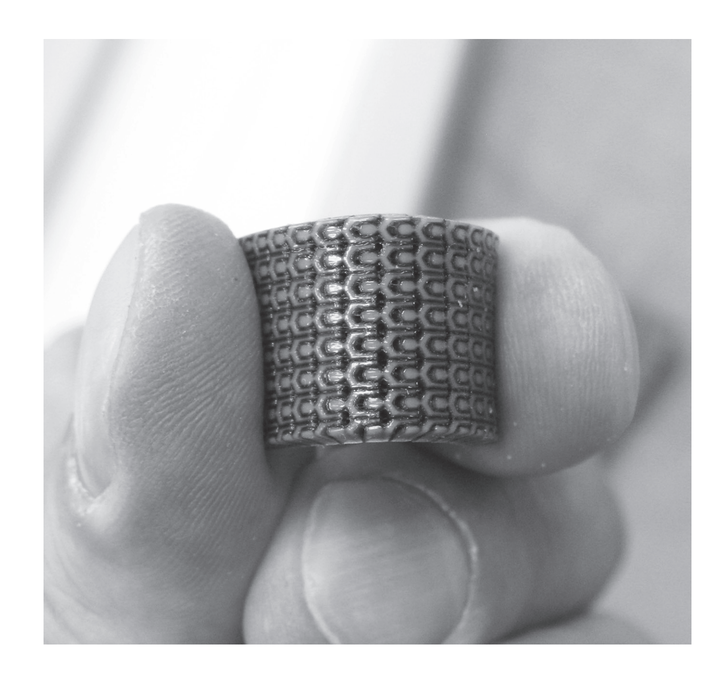
إن المواد الأوكستكية لا توجد في الطبيعة، ويصعب تصنيعها بطرق التصنيع التقليدي. لكن بوجود طابعة ثلاثية الأبعاد تطبع موادَّ متعددة بدقة عالية، يمكن صنع هذه المواد حسب الطلب، وتضمينها داخل تركيبات أخرى لصنع آلات غريبة وجميلة. على سبيل المثال، تُصنع السيارات من مواد مصممة باستخدام مواد أوكستكية لامتصاص الطاقة عند الاصطدام حتى لا يتعرض الركاب لأي أذًى. سيمتص المِصَد الأمامي أثر الاصطدام، ويرسل الطاقة في اتجاهات مختلفة باستخدام أنماط من المواد التقليدية والأوكستكية.

هناك أنماط أخرى يمكن أن تمتلك سلوكيات أكثر فائدة وغرابة. من الممكن طباعة مواد صُلبة ولينة في أنماط رقائقية تجعل الناتج مرنًا في اتجاه وصُلبًا في اتجاه مختلف. هذه الخاصية ربما لا تكون مثيرة في حد ذاتها، حتى تدرك أنه يمكنك طباعة الأشياء بخواص مرنة مخصصة. على سبيل المثال، يمكن لدعامة أو جزء مزروع مخصص مساعدة مريض بعد جراحة في الركبة عن طريق السماح للمريض بثني ركبته بنحو حر في اتجاه ما مع دعم الركبة في اتجاه آخر، ويمكن لقفاز مخصص تحسين قدرة متسلق للصخور على التعلق بالشقوق في الجبال.

خلال زيارتي لشركة أوبجيت، أخرج إدواردو ودانيال من أحد الأدراج بضع قطع من مواد جديدة غريبة. أرياني قطعةً قالا إنها مادة مطبوعة ذاتية الالتئام. وأوضحا أن هذه المادة يمكنها تحمُّل الإجهاد حتى نقطة قصوى ما، ثم عندما يَزيد الإجهاد عن هذا الحد، فإن المادة تنهار، ثم يمكن أن «تلتئم» تمامًا بعد تلاشي الإجهاد.

مثل هذه المادة تُصنع بترسيب مادة خام في «كرات وحُقوق» متشابكة متناهية الصغر. ستظل المادةُ المصنوعة من ملايين المكونات المتشابكة مرنةً حتى تخرج الكرات من حُقوقها. إذا تعرضت المادة للضغط، فإن الكرات سترجع لأماكنها وستستعيد المادة سلوكها الأصلي مرة أخرى.

عندما فحصتُ مادة أوبجيت المبتكرة عن قُرب، بدت كما لو كانت نوعًا من البلاستيك الرَّماديِّ العاديِّ. تخيلتُ كيف يمكن أن تكون مادة الطباعة هذه العادية — والاستثنائية في نفس الوقت — مفيدة. إذا تعرَّض مِصَد الصدمات في سيارتك للتحطم لأنك رجعت واصطدمت بشجيرة في نهاية ممر السيارة خاصتك (وهذا من واقع تجرِبة)، فتخيل كم سيكون من اللطيف إذا كان يمكنك إرجاع المِصَد المنكسر لمكانه مرة أخرى ليلتئم ذاتيًّا بنحو كامل.



تركيب متناهي الصغر ذاتي الالتئام مطبوع بمواد متعددة. تتحرر الكرة والحُقُّ بإجهاد حرِج لكنه يمكنه الاتحاد مرة أخرى واستعادة نمطه الرئيسي (الصورة مهداة من دانيال ديكوفسكي من شركة أوبجيت).

يمكن للمواد الديناميكية التغير من الصلابة لليونة اعتمادًا على كم الإجهاد الذي تتعرض له. ومثل القهوة المطحونة التي تكون صلبة كقطعة الطوب عند تعبئتها بتفريغ الهواء لكنها تتدفق مثل سائل عند تحريرها من الغِلاف، فإن ما يُعرف بالمواد المضغوطة يمكن طباعتها بحيث تغير من صلابتها استجابةً لبيئتها.

أثرُ صُنع الأنماط على خواص المواد بعيدٌ كلَّ البعد عما هو متوقع. يقضي علماء ومهندسو المواد مسيراتهم الوظيفية محاولين التنبؤ بخواص حتى المواد المركبة البسيطة نسبيًّا مثل رقائق ألياف الكربون. سيؤدي ظهور الطابعات الثلاثية الأبعاد التي تستخدم مواد خام متعددة بدقة عالية إلى ظهور حيز تصميم فسيح جديد؛ مما سيجعل من الصعب التنبؤ بخواص المواد التي ستصبح ممكنة الصنع، هذا ناهيك عن استخدامها في التصميم.

وبزيادة قدرات الطابعات الثلاثية الأبعاد في ترسيب المواد المتعددة، سيكتشف الناس موادَّ جديدة بالصدفة أحيانًا، وبالبحث الدقيق في أحيان أخرى. ومثل الحاجة لأدوات جديدة للتصميم بمساعدة الكمبيوتر لمساعدة المصممين في استكشاف أشكال جديدة باستخدام لغات ومفاهيم تصميم جديدة، فإن هناك حاجة إلى أدوات تصميم جديدة لاستكشاف نطاق جديد من المواد.

## (٣) الانتقال من طباعة أجزاء سلبية إلى أنظمة نشطة

حتى الآن، ناقش هذا الفصل طباعة مواد سلبية؛ صُلبة أو لينة، مرنة أو قاسية. تستجيب المواد السلبية لبيئتها المحيطة بنحو آلي قابل للتوقع. في المستقبل، سنطبع مواد نشطة تتصرف وتتفاعل وتشعر وتحسب وتستجيب لبيئتها. وقد واجه السعي إلى طباعة هذه المواد الكثير من النمو المتذبذب؛ ونتيجة لهذا، فإن الأغلبية الكبرى من الأجسام التي نجحت طباعتها بنحو ثلاثي الأبعاد ما زالت من النوع السلبي، سواء أكانت كبيرة أم صغيرة، بسيطة أم معقدة.

أسهل ما يمكن إنجازه في مجال طباعة المواد النشطة هو طباعة المواد الموصلة للكهرباء. نعرف بالفعل كيفية الطباعة بالمعادن التي هي مواد موصلة جيدة. ما المشكلة إذن؟ التحدي يكمن في طباعة مواد موصلة للكهرباء موضوعة داخل مادة غير موصلة مثل أسلاك النُّحاس المغلفة بعازل بلاستيكي. إذا أمكنك طباعة مواد موصلة داخل مواد غير موصلة، فيمكنك طباعة — على سبيل المثال — أجزاء الروبوتات بشبكة أسلاك مجمَّعة سلفًا، وأغطية للهواتف المحمولة بهوائيات معقدة بمواصفات خاصة، وأجزاء تعويضية بمستشعرات داخلية، وأنواع جديدة تمامًا من الأجهزة الإلكترونية الاستهلاكية.

تُمثِّل طباعة أسلاك موصلة تحديًا مزدوجًا؛ تحديًا يتجاوز مجرد الطباعة بمواد متعددة، إنه يكمن في التأكد من أن المادتين متوافقتان على نحو متبادل، فإذا حاولتَ الطباعة باستخدام المعادن والبلاستيك في نفس الوقت، فإن درجة الحرارة المطلوبة لانصهار المعدِن ستحرق البلاستيك مما يجعل المادتين غير متوافقتين.

من الممكن العثور على أنواع خاصة من المعادن الموصلة التي تمتلك درجة حرارة انصهار منخفضة متوافقة مع البلاستيك، لكن هذه المواد نادرة الوجود وصعبة الاستخدام. بدلًا من ذلك، من الممكن العثور على موصلات غير معدِنية مثل البلاستيك الموصل للكهرباء لكنها ما تزال أقل في الموصلية من المعادن؛ ولذا يستمر البحث.

داخل شركة أوبجيت، كان إدواردو ودانيال واثقَيْن من أن طباعة المواد الموصلة للكهرباء المضمنة داخل مواد هيكلية غير موصلة أمرٌ ممكن الحدوث. كانا مصرَّيْن أن التحديَ ليس تقنيًّا لكنه مسألة أولوية عمل. تسعى الصناعة الخاصة بالطباعة الثلاثية الأبعاد الآن للوصول لمواد طباعة ثلاثية الأبعاد تتميز بقوةٍ وتحمُّل أكبر. وما زالت المواد الموصلة تكمن فيما وراء الأفق التِّجاري القصير الأمد؛ فهي ليست أولوية بعدُ.

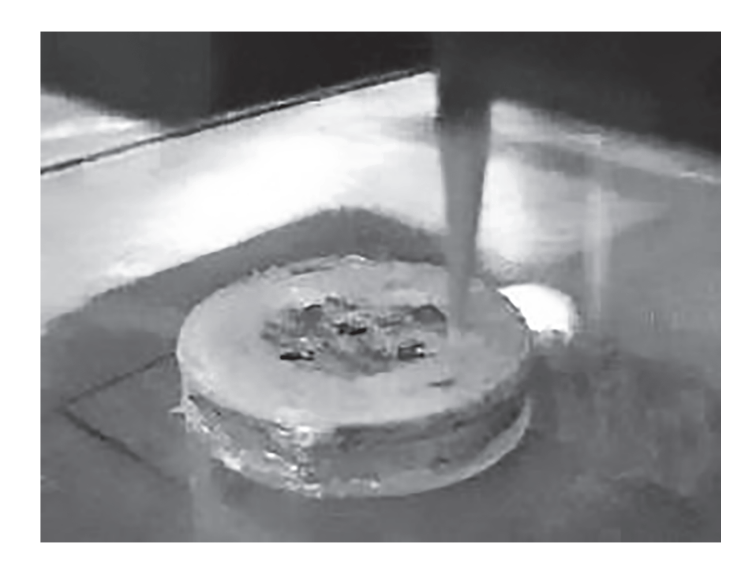
هناك حلقة مفرغة هنا؛ فالصناعة تبحث عن مواد خام أقوى لأنها تبحث عن منافسة المواد والقدرات الحالية لتقنيات التصنيع التقليدية. إن القدرة على تصنيع شبكة أسلاك داخلية بنحو ثلاثي الأبعاد أمرٌ غير موجود حاليًّا بأي شكل في أي نوع من التصنيع التقليدي. وباستثناء بعض مصممي الروبوتات التقدُّميين، لا توجد أية سوق بعدُ لشبكات الأسلاك المطبوعة بنحو ثلاثي الأبعاد.

على الرغم من ذلك، فإن العلم يحتِّم أن تنظر إلى ما وراء الأفق القصير المدى، فإذا نظرت إلى المستقبل البعيد، فإن المواد الموصلة ستكون قمة الجبل الجليدي الخاص بالمواد النشطة، وطباعة البطاريات والمحركات والمشغلات الميكانيكية والترانزستورات والمستشعرات هي جزء بسيط فقط من الاحتمالات التي يستكشفها الباحثون اليوم.

عندما ننظر إلى طباعة المواد النشطة، ففي الواقع نحن نتحدث عن طباعة أنظمة نشطة. من النادر أن تكون أي مادة نشطة مفيدة في حد ذاتها؛ فعادةً ما يتطلب الأمر دمج عدة مواد نشطة معًا لإنتاج شيء مفيد. يكمن التحدي في الانتقال من طباعة أجزاء سلبية مصنوعة من مادة واحدة إلى طباعة أنظمة نشطة متكاملة من مواد متعددة.

تُعد البطارية المطبوعة بنحو ثلاثي الأبعاد مثالًا جيدًا على نظام متكامل. إذا فتحتَ كتابًا عن كيمياء البطاريات، فستجد عشرات الطرق لصنع البطاريات سواء كانت بطاريات قلوية تقليدية أو بطاريات ليثيوم أيون قابلة لإعادة الشحن أو بطاريات زنك-هواء، أو غيرها الكثير. تمتلك جميع البطاريات نفس التركيب الأساسي؛ مادة للقطب الموجب وأخرى للسالب بـ «طبقة فاصلة» بينهما؛ مثل ساندوتش جُبن بقطعة خبز أبيض من أعلى وقطعة خبز من القمح الكامل من أسفل، بعد ذلك يُطوَى هذا الساندوتش الكبير الرفيع ويُوضع في أنبوب ويُوصل بسلكين أحدهما يتصل بالقطب الموجب والآخر بالسالب.

ما يجعل البطارية تعمل هي الأيونات (الذرات المشحونة) الموجودة في القطب الموجب والتي تريد بشدة الانتقال إلى القطب السالب. وعندما تنتقل إليه، تصنع تيارًا كهربائيًّا ضئيلًا. تساهم التركيبات المختلفة لمواد القطبين الموجب والسالب (الخبز) والطبقات

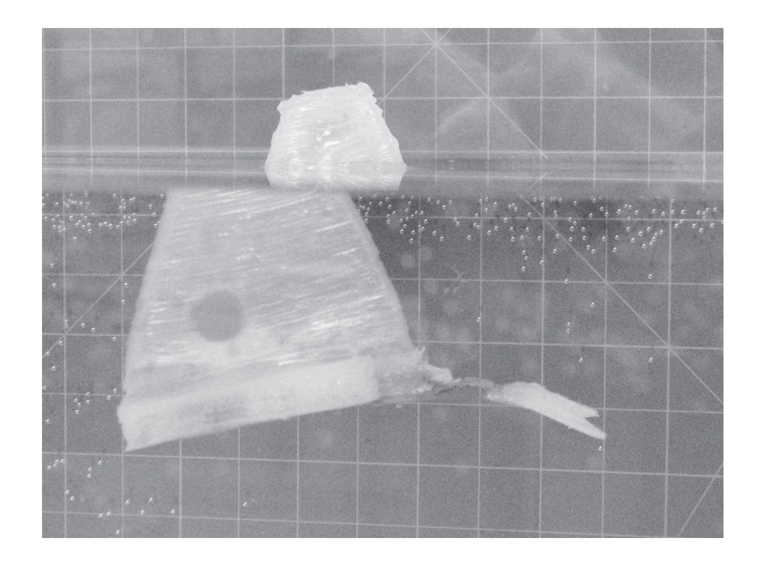


بطارية مطبوعة.

الفاصلة (الجبن) والأشكال الهندسية للبطارية في اتساع نطاق أنواع البطاريات وسمات أدائها.

انضم إيفان مالون إلى معملنا في جامعة كورنيل بعد ظهور خبر الروبوت الأول على جريدة «ذا نيويورك تايمز». كان هدف إيفان هو طباعة روبوت يخرج ماشيًا على قدميه من الطابعة. وقبلَ مواجهة أي تحديات تقنية بفترة طويلة، احتاج إيفان لمواجهة تحدٍّ من نوع آخر؛ فلم تكن تسمح أي طابعة تِجارية متاحة في ذلك الوقت، للناس من خارج الشركة، باستكشاف أي مواد جديدة. كانت شركات الطباعة الثلاثية الأبعاد تحمي براءات الاختراع لموادها بإحكام، وكانت أي محاولة لاستخدام مواد غير مصرَّح بها تؤدي إلى خسارة الضمان. علاوة على ذلك، فإن أي باحث متعقل لن يضع موادَّ نشطة في آلةٍ ثمنها يصل إلى مائة ألف دولار لتعلق داخلها وتتوقف عن العمل.

ألهم السعي من أجل استكشاف مواد جديدة متحررة من القيود التي تفرضها الطابعات التِّجارية الحالية (القيود التقنية والتعاقدية) مشروع فاب آت هوم (وبدرجةٍ ما أيضًا مشروع ريب راب) وسلسلة من المنصات المفتوحة «القابلة للاختراق» للطابعات



روبوت إيفان مالون الذي على هيئة سمكة والمطبوع بنحو ثلاثي الأبعاد، والذي يتضمن بطارية ومشغلًا ميكانيكيًّا (٢٠١٠). بطبيعة الحال لم يخرج الروبوت سابحًا من الطابعة.

الثلاثية الأبعاد التي ظهرت بعد ذلك. إن الطابعات الرخيصة البسيطة المعتمدة على أسلوب الصنع الذاتي أكثر انفتاحًا أمام الابتكار وأقل مأساوية بالنسبة إلى مستخدمها إذا تعطلت عن العمل.

وضع إيفان المواد المناسبة داخل طابعة ثلاثية الأبعاد، وواجه أول عقبة فورًا؛ إذ تحولت المادة المصنَّعة للقطب الموجب — وهي مسحوق الزنك — إلى معجون، ورفضت التدفق من رأس المِحْقن، وكلما ضُغط زادت مقاومة المادة.

عندما تغلَّب على المشكلة باستخدام أنواع مختلفة من الصابون والجل، واجه التحديَ التالي؛ كانت وصفة الصنع الخاصة بمعظم البطاريات تحتِّم وضع طبقة فاصلة مصنوعة من الورق؛ وحتى البطاريات التِّجارية الموجودة في منزلك، غالبًا ما تمتلك طبقة ورقية تفصل بين مادتي القطبين السالب والموجب (هذه هي شريحة الجبن التي تقع بين شريحتي الخبز). لا يمكن أن تكونَ هذه الطبقة الفاصلة مصنوعة من أي مادة؛ بل يجب أن تكون من مادة شبه منفِذة؛ مما يتيح للأيونات التدفق من خلالها من دون

تدفق الإلكترونات. الورق مادة مثالية، لكن، وللمفارقة، يمكننا الطباعة بأي شيء تقريبًا ما عدا الورق. وبعد شهور من التجارِب، اكتشف إيفان طريقة لصنع طبقة فاصلة قابلة للطباعة مصنوعة من نوع خاص من الجل.

بامتلاك إيفان لوصفة جديدة وخمس مواد مختلفة، طبع مجموعة متنوعة من البطاريات، ورغم أن سعة طاقتها كانت تقريبًا نصف سعة أي بطارية صناعية محسَّنة بنفس الحجم، كان شكلها الهندسي مخصصًا بالكامل. كان يمكنه الآن طباعة بطاريات بأي شكل يريده؛ على سبيل المثال، على هيئة ساق ليستخدمها كجزء من روبوت.

تُعتبر طباعة المشغلات الميكانيكية — وهي نظم مصنوعة من مواد نشطة قادرة على الحركة — أكثر تحديًا. طبعنا مشغلات نشطة كهربائيًّا من البوليمر والشمع، وحتى مشغلات كهرومغناطيسية. ومع ذلك، فإن التحديَ الأكبر يكمن في جمعها معًا؛ فلا يكفي مشغل واحد فقط أو بطارية مفردة. أفضل إنجاز للطباعة المتعددة المواد النشطة سيكون صنع روبوت كامل يمكنه الخروج من الطابعة ماشيًا مكتملًا بالبطاريات.

## (٤) المرحلة الأخيرة: التحول من العالم التناظري إلى العالم الرقمي

بعد المرحلة السابقة، تأتي مرحلة جديدة تمامًا، وهي الأكبر والأكثر طموحًا، والتي تتضمن الانتقال من العالم التناظري إلى العالم الرقمي. قبل المضي قدمًا، نحتاج إلى توضيح أمرٍ ما. استخدمنا كلمة «رقمي» بإفراط، وهي يمكن أن تعنيَ أمورًا مختلفة في سياقات مختلفة:

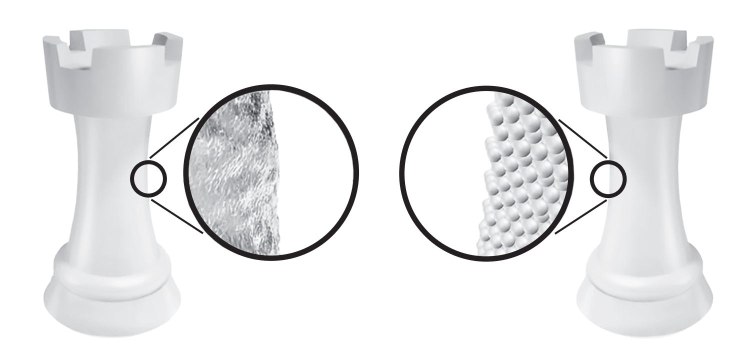
(١) معلومات افتراضية تمامًا وغير مجسدة، كما في «مادي في مقابل رقمي»؛ على سبيل المثال، جريدة رقمية.

(٢) إلكتروني وقابل للبرمجة، كما في «آلي مقابل رقمي»؛ على سبيل المثال، ثرموستات رقمي.

(٣) مصنوع من وحدات متفرقة غير متصلة، كما في «تناظري مقابل رقمي»؛ على سبيل المثال، ساعة رقمية.

يحدث الارتباك بسبب أن أجهزة الكمبيوتر الرقمية تُتيح مجالًا لحدوث المعاني الثلاثة؛ فهي في نفس الوقت تعرض المعلومات بنحو افتراضي وإلكتروني، وباستخدام بتات منفصلة من الواحد والصفر، لكن من الممكن امتلاك أجسام «رقمية» توجد في شكل

مادي، وفي نفس الوقت تحتفظ بطبيعتها الرقمية بالمعنيين الآخرين للكلمة؛ فهي قابلة للبرمجة ومكونة من الكثير من البِتَّات المنفصلة الصغيرة.



مادة تناظرية مقابل أخرى رقمية. المواد الرقمية مصنوعة من بتات مادية منفصلة تُسمَّى الفوكسلات (الصورة مهداة من جوناثان هيلر).

معظم الأجسام المادية تمتلك سلوكًا تناظريًّا، والأنظمة التناظرية مستمرة؛ مما يعني أنها تتحرك بنحو سلس — مثل عقرب الدقائق في الساعة الذي يتحرك بسلاسة في أوضاع وسيطة لا نهائية على مدار الساعة. لكن الساعة الرقمية لا تتحرك بنحو مستمر؛ فهي تمتلك ٦٠ حالة وسيطة، وتكون في حالة ثم تنتقل إلى الأخرى لحظيًّا. إن ملفات الكمبيوتر رقمية؛ ما يعني أنها مكونة من الواحد والصفر، ولا يوجد شيء في المنتصف بينهما.

وبالعكس، فإن معظم أساليب التصنيع الحالية لا يمكن اعتبارها تناظرية لأن المواد المُنتَجة عمليًّا مستمرة، لكن لا يجب أن تكون هذه هي الحالة.

قابلت نيل جيرشينفيلد لأول مرة في مركز البتات والذرات خاصته في معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا. في حقيقة الأمر، تملَّكتني الغَيرة من الاسم الرائع الذي اختاره لمركزه. لم أكن لأختار اسمًا يصف جوهر عملي أفضل من هذا. كان هذا في صيف عام ٢٠٠٥، وكنا قد أنهينا لتوِّنا المرة الأولى من طباعة البطاريات. كانت البطارية المطبوعة «رقمية» بمعنى أنها نشطة إلكترونيًّا، لكنها كانت مادية وتناظرية جدًّا بالمعنيين الآخرين؛ حيث كانت مكونة من دفقات مستمرة من المواد الخام.

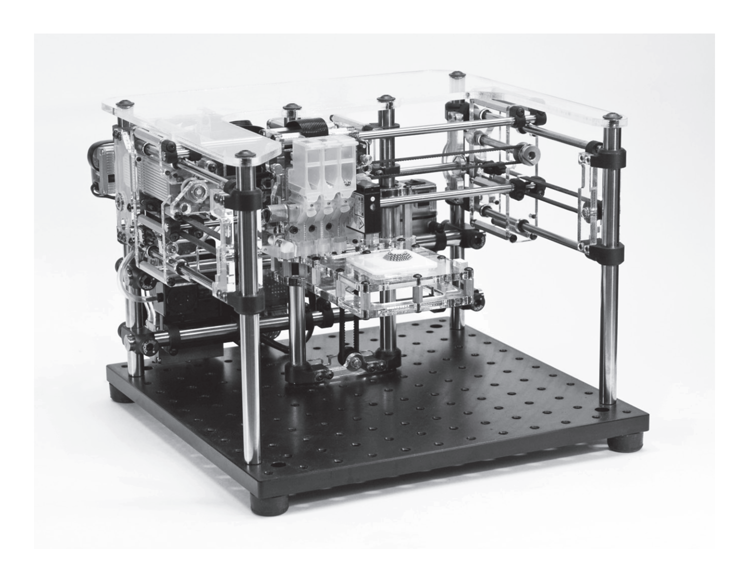
وصفتُ له أول محاولة لنا لطباعة دائرة إلكترونية بنحو مستفيض. وكان رد فعله نافذَ الصبر؛ إذ قال: «لماذا لا تُرسب شريحة إلكترونية بداخلها الدائرة المصنَّعة سلفًا بالكامل؟» بينما مد يده في درجٍ ما وأخرج شريحة ترانزستور متناهية الصغر لا تزيد في حجمها عن حجم حبة الأرز، فماذا لو رسبنا قطيرات … من الدوائر الكهربائية بدلًا من قطيرات الحبر؟

في البداية، ظننت أن جيرشينفيلد لم يفهم المغزَى من الأمر؛ فترسيب مكونات دوائر إلكترونية مصنعة سلفًا يُعتبر غشًّا؛ فهو يلغي بالكامل الهدف من وراء طباعة الدوائر الإلكترونية في المقام الأول، لكن كلما فكرت في الأمر، أصبح منطقيًّا بالنسبة إليَّ؛ فأي حياة بيولوجية مكونة من ٢٢ عنصرًا أساسيًّا — وهي الأحماض الأمينية — ترتب نفسها بتبديلات مختلفة لتُنتج أعدادًا لا حصر لها من البروتينات وأشكال الحياة في النهاية.

ربما يرى علماء الأحياء أن الحياة لا تتعلق فقط بالأحماض الأمينية. بالطبع، تحتاج الأجسام الحية إلى الطاقة لتجمع الأحماض الأمينية معًا أو تفككها. لكن إلى حد كبير يتكون هيكل الحياة من العناصر الأساسية المتمثلة في الأحماض الأمينية. هذا يتيح إمكانية الإصلاح الذاتي لأشكال الحياة البيولوجية، ويمكن للحيوانات والنباتات التهام بعضها بعضًا وإعادة استخدام المادة الحيوية؛ لأننا جميعًا مصنوعون من نفس المجموعة الصغيرة نسبيًّا من العناصر الأساسية البالغ عددها ٢٢ عنصرًا.

بنفس الطريقة التي يكون بها البكسل العنصر الأساسي لأي صورة، والبت هو وحدة بناء المعلومات، والحَمض الأميني هو وحدة بناء الجسم الحي، فإن الفوكسل هو البكسل الحجمي. إن الوحدات الأساسية للأجسام المادية هي الذرات. والوحدات الأساسية للمادة المطبوعة ستكون أكبر في الحجم بضع مئات من الميكرونات، وهو ما يساوي حبة رمل.

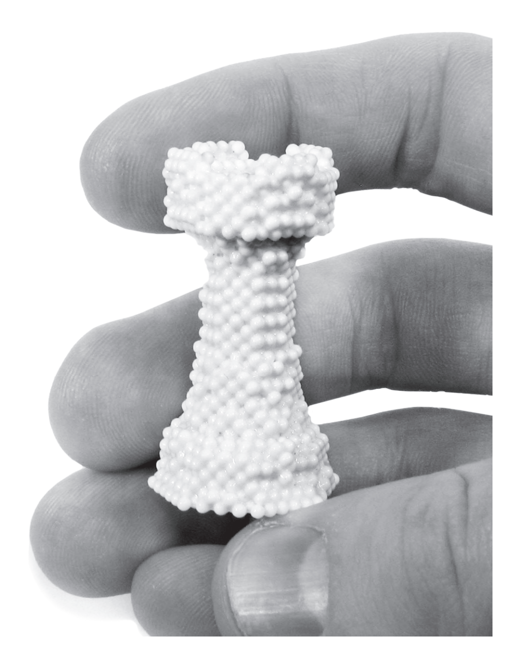
ومثل بضعة ألوان في لوحة الرسام، يمكن لأنواع قليلة من الفوكسلات فعل الكثير. إذا كان يمكن لأنواع العناصر الاثنين والعشرين تكوين كل الحياة البيولوجية، فإن بضعة فوكسلات أساسية يمكن كذلك أن تفتح المجال لنطاق كبير من الاحتمالات. بدايةً، دعونا نمزج بين الفوكسلات الصلبة واللينة. وباستخدام هذين النوعين فقط من الفوكسلات، من الممكن صنع مواد صلبة ولينة. وبإضافة الفوكسلات الموصلة، يمكن صنع شبكات الأسلاك. وبإضافة فوكسلات المقاومات والمكثفات والمحثات والترانزستورات، يمكن صنع الدوائر الكهربائية. وبإضافة فوكسلات المشغلات الميكانيكية والمستشعرات، سنحصل في النهاية على روبوتات.



المُجَمِّع السريع، مثل الطابعة الثلاثية الأبعاد، يبني الأجسام طبقة بطبقة، لكنه يفعل هذا بتجميع أعداد كبيرة جدًّا من العناصر الأساسية المتناهية الصغر (الصورة مهداة من جوناثان هيلر).

لا توجد الفوكسلات بعدُ خارجَ جدران المعامل، ولا تعمل الطابعات التي يمكنها التعامل معها بعدُ على مستوًى عملي. لكن فكرة أن الأجسام التي نستخدمها في الحياة اليومية ستكون مصنوعة من مليارات الفوكسلات المتناهية الصغر من أنواع قليلة نسبيًّا، أمرٌ محير للعقل. وكما أن الأحماض الأمينية هي المُعامِل المشترَك الأصغر الذي يمكِّن الطبيعة من تدوير المواد بنحو مثالي، فإذا صُنعت كل المنتجات من بضع عشرات من الأنواع من الفوكسلات الأساسية، فيمكن أن «تُطبع» المنتجات ثم تتحلل لتُعاد طباعتها على هيئة منتجات أخرى.

لتحقيق هذه الرؤية، نحتاج إلى صنع فوكسلات متناهية الصغر، والعثور على طريقة لتجميعها بنحو سريع. يوضح حساب سريع أنه لصنع جسم صغير في حجم صندوق حذاء من فوكسلات بحجم ذرات الرمال، ستحتاج تقريبًا لمليار فوكسل، وتجميع مليار فوكسل يمكن أن يستغرق الكثير من الوقت؛ حتى لو كان بإمكان روبوت تجميعها بدقة



أول جسم مبنيٍّ من ١٠ آلاف فوكسل مجمَّع بمُجمع سريع. ما زال الشكل الخارجي فظًّا مثل رسوم الكمبيوتر المبكرة. ربما يومًا ما سنمتلك طابعة تُجمع جيجا فوكسل معًا؟ (الصورة مهداة من جوناثان هيلر).

بمعدل فوكسل في الثانية الواحدة، فسيستغرق الأمر نحو ٣٠ عامًا. الحل هو تجميع الكثير من الفوكسلات بنحو متوازٍ أو ترسيب طبقة كاملة من الفوسكلات في المرة الواحدة بنحو متزامن.

في المستقبل، ربما تكون المجمِّعات قادرة على استيعاب أعداد ضخمة من الفوكسلات بنحو متوازٍ (أي العديد من الفوكسلات في المرة الواحدة) وترسيبها في طبقات بنحو متزامن؛ مما يفتح الباب لما سيصبح يومًا ما «المواد الرقمية». للتفرقة بين هذه الطابعات وأسلافها التناظريين، أطلقنا اسم «المُجمِّعات السريعة» على هذا الجيل الجديد من الآلات. ستكون الثورة التالية للطباعة الثلاثية الأبعاد هي الانتقال من المواد الخام التناظرية إلى المواد الخام الرقمية.

## (٤-١) الطباعة الهجينة التي تجمع بين المواد التناظرية والرقمية

تخيَّل مستقبلًا تتكون فيه الأجسام المصنوعة من مليارات العناصر الأساسية المتناهية الصغر، وكل هذه العناصر لها نفس الحجم والشكل ونفس الموصلات الكهربائية والميكانيكية. ومثل مكعبات الليجو المتناهية الصغر التي لا تزيد في حجمها عن مائة ميكرون — أيْ حجم أيِّ بكسل على شاشتك — فإنها ستتشابك مع بعضها. كل نوع من أنواع العناصر الأساسية الاثنين والعشرين سيُصنع بنحو منفصل بأعداد كبرى، ويُشحن على هيئة مسحوق في خرطوشة خاصة بمُجمِّع.



نموذج توضيحي للطباعة التي تمزج بين المواد الرقمية والتناظرية. طُبع الجسم بمادة تناظرية شفافة (ملساء السطح). في الداخل هناك شبكة رقمية مرئية من الفوكسلات الصورية (الصورة مهداة من روبرت ماكردي).

ربما يكون اليوم الذي تكون فيه المنتجات مصنوعة بالكامل من الفوكسلات الرقمية ما زال بعيدًا، لكن في الوقت الحاليِّ أتوقع ظهور بعض المزج بين المواد التناظرية والرقمية. ستضم الطباعة الثلاثية الأبعاد الهجينة الطباعة التناظرية المستمرة لبعض المواد السلبية والطباعة الرقمية بالفوكسلات لمواد أخرى يصعب تصنيعها باستخدام العمليات المستمرة.

## (٥) آلات تصنع آلات

التفرد التقني — وهو مفهوم نشره الكاتب راي كيرزويل — هو مستقبل افتراضي تمتلك فيه الآلاتُ قدراتٍ تُمكِّنها من تسريع تطورها الذاتي بنحو مطَّرِد. أحد أكثر الجوانب المدركة بنحو كبير لفكرة التفرد هو «الانفجار الذكي»؛ حيث تصمم الآلات الذكية أجيالًا متتالية من الآلات المتزايدة في القوة والذكاء.

وعلى الرغم من التطور الذي وصلت إليه آلات التصنيع في العصر الحديث، فإنها لا تمتلك القدرة على تصميم وإنتاج نسخ مادية من نفسها، فلا يمكن لآلات اليوم إعادة تصميم نفسها استجابةً لتحدٍّ ما في بيئتها المادية. ستتحدى تقنيات الطباعة الثلاثية الأبعاد فكرتنا عما هو طبيعي أو معتاد أو أصلي بتوفير الحلقة المفقودة في فكرة التفرد.

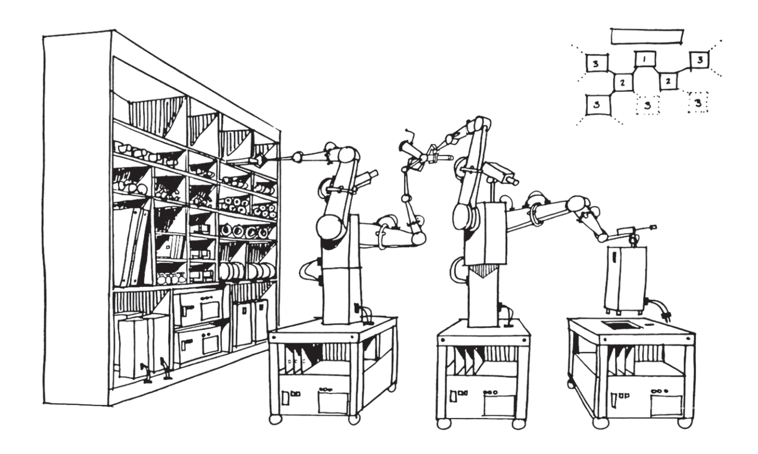
ستقدِر الطابعات الثلاثية الأبعاد يومًا ما على تصنيع مواد نشطة رقمية لها القدرة على إعادة تهيئة نفسها لتصبح آلات ذكية ستقوم بدورها بإعادة تصميم وصناعة نسخ محسَّنة من نفسها.

تُعتبر فكرة الآلات المصنِّعة للآلات فكرةً متكررة في قصص الخيال العلمي والدراسات الأكاديمية الجادة. هناك سببان محتملان لهذا الافتتان بالفكرة: الأول هو نظرة عملية لقابلية التوسع. إن صنع أي آلة يمكنها صنع المزيد من الآلات يستغل التكنولوجيا لأقصى حد؛ فبغياب العنصر البشري عن العملية، يصبح الإنتاج قائمًا فقط على توافر المادة الخام والطاقة والوقت.

السبب الثاني لهذا الافتتان بهذا الموضوع ربما يرتبط باحتياج نفسي أعمق — أو ما يمكن أن يسميَه البعض اعتزازًا بالذات — وهو احتياجنا لإبداع الأشياء. إن الأمر الذي يميز الشيء الطبيعي عن الشيء الصناعي هو أن الأول يمكن أن يتكاثر، أما الآخر، فلا. والتكاثر الذاتي في جوهره هو السمة الأسمَى لعالم لأحياء. وإذا كان يمكنك صنع آلة تصنع آلات أخرى؛ فستكون قد وصلت لمستوًى جديد من الإبداع.

في المستقبل — أو منذ زمن طويل في مجرة بعيدة جدًّا — ستتمكن الآلات من صنع آلات أخرى، والطابعات الثلاثية الأبعاد هي أول موجة من جيل جديد من الآلات سيصمِّم آلات أخرى ويصنعها ويُصلِحها ويعيد تدويرها؛ فحتى الآلات ستهيئ وستطور آلات أخرى؛ ونفسها كذلك.

في إحدى المرات، اصطحبتُ ابني لمشاهدة أحدِ أجزاء سلسلة أفلام «حرب النجوم». خلال عددٍ من المشاهد، كان العديد من سفن الفضاء والروبوتات المسلحة بالليزر ووسائل



صورة من دراسة أُجريت تحت رعاية وكالة ناسا بعنوان «مصنع ذاتي التناسخ والنمو فوق القمر» لروبرت إيه فريتاس الابن ووليام بي جيلبريث، المعهد الأمريكي للملاحة الجوية والفضائية، ١٩٨١ (الصورة مهداة من روبرت إيه فريتاس الابن. (www.rfreitas.com)).

التدمير الأخرى تفجِّر أعدادًا ضخمة من الأشياء؛ أبنية ومَرْكبات وروبوتات أخرى. وأخيرًا، وبعد مشاهدة الدمار الذي لا يتوقف، تقمصتُ هيئة الناضجين وقلت لابني بصوت خفيض: «يا لها من خسارة! مجهود ضخم بذله آلاف البشر يذهب هباءً في ثوانٍ معدودة. ستستغرق إعادة بناء كل هذا شهورًا، إن لم يكن سنوات.»

لم يكن ابني يمتلك أي فكرة عما أتحدث عنه.

وقال: «لم يَبنِ البشر هذا، بل الروبوتات.»

# مراجع


## الفصل الثاني: آلة يمكنها صنع أي شيء تقريبًا

(1) Neal Gershenfeld, *When Things Start to Think* (New York, NY: Henry Holt & Company, 1999).

(2) Nicholas Negroponte, *Being Digital* (New York, NY: Random House, 1995).

## الفصل الثالث: التصنيع الذكي: جيد وسريع وقليل التكلفة

(1) Quote from a press conference covered by VentureBeat in May 2012. http://venturebeat.com/2012/05/10/3d-systems-ceo-we-want-3d-printing-to-be-as-big-as-the-ipad/.

(2) Quote from Terry's blog, July 2012. http://wohlersassociates.com/blog/2012/07/why-most-adults-will-never-use-a-3d-printer/.

## الفصل الرابع: اقتصاد الغد القائم على المنتجات القابلة للطباعة

(1) Chris Anderson, *The Long Tail: Why the Future of Business is Selling Less of More* (New York, NY: Hyperion Press, 2008).

(2) Joseph Pine and James Gilmore, *The Experience Economy* (Boston, MA: Harvard Business School Press, 1999).

(3) Eric Reis, *The Lean Startup: How Today's Entrepreneurs Use Continuous Innovation to Create Radically Successful Businesses.* (New York, NY: Crown Publishing Group, 2011).

(4) http://en.wikipedia.org/wiki/Microcredit.

## الفصل الخامس: الطباعة في طبقات

(1) Harris L. Marcus, Joel W. Barlow, Joseph J. Beaman, and David L. Bourell, "From computer to component in 15 minutes: The integrated manufacture of three-dimensional objects." *JOM: Journal of the Minerals, Metals and Materials Society* 42, no. 4 (1990): 8–10.

(2) Paul Williams, "Three Dimensional Printing: A New Process to Fabricate Prototypes Directly from CAD Models." Master's thesis, MIT Mechanical Engineering, 1990.

(3) Christophe Chaput and J. B. Lafon, "3-D Printing Methods: 3-D Printing Based On Laser Stereolithography Opens Up New Application Fields for Advanced Ceramics." *Ceramic Industry* (2011): 15-16.

(4) Grant Marchelli, Renuka Prabhakar, Duane Storti, and Mark Ganter, "The Guide to Glass 3D Printing: Developments, Methods, Diagnostics and Results." *Rapid Prototyping Journal,* 17, no. 3 (2011): 187–194.

## الفصل السادس: برامج التصميم: لوح الرسم الرقمي

(1) John Walker, "The Autodesk File: Bits of History, Words of Experience," Fourth Edition (1994). Retrieved from http://www.fourmilab.ch/autofile/.

(2) Richard P. Feynman, *Surely You're Joking, Mr. Feynman!* (Bantam, 1985).

## الفصل السابع: الطباعة الحيوية بالحبر الحي

(1) Russ Banham. “Printing a Medical Revolution.” Connections. T. Rowe Price (May 2012).

(2) E. C. Armstrong (Ed.), *The Medieval French Roman d’Alexandre, Vol. 2* (Princeton, NJ: Princeton University Press, 1937).

(3) White House press release, June 4, 2012. http://www.whitehouse.gov/the-press-office/2012/06/04/remarks-vice-president-joebiden-cypress-bay-high-school-graduation-cere.

(4) Figures cited from Phil Reeves were gathered from Joris Peel’s blog article, “3D printing in medicine: What is happening right now in patients,” February 2011. http://i.materialise.com/blog/entry/3d-printing-in-medicine-what-is-happening-right-now-in-patients.

(5) Figures cited from Phil Reeves were gathered from Joris Peel’s blog article, “3D printing in medicine: What is happening right now in patients,” February 2011. http://i.materialise.com/blog/entry/3d-printing-in-medicine-what-is-happening-right-now-in-patients.

(6) Quote from Russ Banham. “Printing a Medical Revolution.” *Connections.* T. Rowe Price (May 2012).

(7) Cyrille Norotte, Francois S. Marga, Laura E. Niklason, and Gabor Forgacs, “Scaffold-free vascular tissue engineering using bioprinting.” *Biomaterials,* 30(30) (2009): 5910–5917.

(8) Emma Marris, “How to print out a blood vessel,” *Nature* online. March 2008. http://www.nature.com/news/2008/080320/full/news.2008.675.html.

(9) Miguel Castilho, Ines Pires, Barbara Gouveia, and Jorge Rodrigues, “Structural evaluation of scaffolds prototypes produced by three-dimensional printing.” *Journal of Advanced Manufacturing Technology,* 56 (2011): 561–569.

(10) http://biomimicry.net/letter.html.

(11) Quote from Russ Banham. "Printing a Medical Revolution." *Connections.* T. Rowe Price (May 2012).

(12) V. Mironov, T. Boland, T. Trusk, G. Forgacs, and R. R. Markwald, "Organ printing: computer-aided jet-based 3D tissue engineering." *Trends Biotechnol,* 21(4) (2003 Apr): 157–61.

(13) "Printing Living Tissues: 3-D Printed Vascular Networks Made of Sugar," *ScienceDaily,* July 1, 2012. http://www.sciencedaily.com/releases/2012/07/120701191617.htm.

(14) Zhuo Xiong, Yongnian Yan, Renji Zhang, and Xiaohong Wang, "Organism manufacturing engineering based on rapid prototyping principles." *Rapid Prototyping Journal,* 11(3) (2005): 160–166.

## الفصل الثامن: المطبخ الرقمي

(1) Concept designs developed in collaboration with Amit Zoran. Prototypes developed with the assistance of Zachary Nelson, Josh Ramos, and Varun Perumal.

(2) http://web.media.mit.edu/~marcelo/cornucopia/.

(3) Stephen Wolfram blog, "The Personal Analytics of My Life," March 8, 2012. http://blog.stephenwolfram.com/2012/03/the-personal-analytics-of-my-life/.

(4) "4 Most Harmful Ingredients in Packaged Foods," *Reader's Digest* online. http://www.rd.com/health/diet-weight-loss/4-most-harmful-ingredients-in-packaged-foods/.

(5) Rachel Laudan, "In Praise of Fast Food," *Utne Reader,* September-October 2010.

(6) Rachel Laudan, “In Praise of Fast Food,” *Utne Reader,* September-October 2010.

(7) Marcel Dicke and Arnold Van Huis, “The Six-Legged Meat of the Future.” *Wall Street Journal,* February 19, 2011. http://online.wsj.com/article/SB10001424052748703293204576106072340020728.html.

## الفصل التاسع: مصنع داخل الفصل المدرسي

(1) High Schools: Are they doing their job?: Much criticism. Much anxiety. What’s the truth?” *Changing Times* 10 (1956): 27–29.

(2) NSF Report, Horwitz, 1995.

(3) Frank Coffield, David Moseley, Elaine Hall, and Kathryn Ecclestone, *Learning styles and pedagogy in post-16 learning: A systematic and critical review*. (Published by the Learning and Skills Research Centre, 2004).

(4) Frank Coffield, David Moseley, Elaine Hall, and Kathryn Ecclestone, *Learning styles and pedagogy in post-16 learning: A systematic and critical review.* (Published by the Learning and Skills Research Centre, 2004).

(5) Harold Pashler, Mark McDaniel, Doug Rohrer, and Robert Bjork. “Learning Styles: Concepts and Evidence.” *Psychological Science in the Public Interest* 9(3) (2008).

(6) Glenn Bull, Gerald Knezek, and David Gibson, “A rationale for incorporating engineering education into the teacher education curriculum.” *Contemporary Issues in Technology and Teacher Education,* 9(3) (2009): 222–225.

(7) Cheryl A. Cox and John R. Carpenter, “Improving attitudes toward teaching science and reducing science anxiety through increasing confidence in science ability in inservice elementary school teachers.” *Journal of Elementary Science Education,* 1(2) (1989): 14–34.

## الفصل العاشر: آفاق جديدة في التصميم والهندسة المعمارية والفن

(1) "MIT Looks at Printing Buildings." http://fabbaloo.com/blog/2011/4/13/mit-looks-at-printing-buildings.html

(2) Stephen Todd and William Latham, *Evolutionary Art and Computers.* (Academic Press, September 1992).

## الفصل الحادي عشر: تصنيع نظيف وصديق للبيئة

(1) China Labor Watch reports. http://www.chinalaborwatch.org/.

(2) "ATKINS: Manufacturing a Low Carbon Footprint. Zero Emission Enterprise Feasibility Study." Project number N0012J, October 2007. Lead Partner: Loughborough University.

(3) "ATKINS: Manufacturing a Low Carbon Footprint. Zero Emission Enterprise Feasibility Study." Project number N0012J, October 2007. Lead Partner: Loughborough University.

(4) Whitney MacDonald, "Time for Titanium Processing." *CSIRO Process* magazine (June 2005): 1–2. http://www.csiro.au/files/files/p81m.pdf

(5) "ATKINS: Manufacturing a Low Carbon Footprint. Zero Emission Enterprise Feasibility Study." Project number N0012J, October 2007. Lead Partner: Loughborough University.

(6) http://en.wikipedia.org/wiki/Recycling.

(7) Susan Freinkel, *Plastic: A Toxic Love Story* (New York, NY: Houghton Mifflin Harcourt Publishing, 2011).

(8) Stat from Global Environmental Polymers, Inc. http://www.degradablepolymers.com/plastic_pollution.html.

(9) Capt. Charles Moore with Cassandra Phillips, *Plastic Ocean: How a Sea Captain's Chance Discovery Launched a Determined Quest to Save the Oceans* (Avery, 2011).

(10) Joris Peels, “3D printing vs Mass Production: Part IV More beautiful landfill.” i.materialise blog (June 29, 2011). http://i.materialise.com/blog/entry/3d-printing-vs-mass-production-part-iv-more-beautiful-landfill.

(11) American Chemistry Council, “2005 National Post-Consumer Plastics Bottle Recycling Report” (2005).

## الفصل الثاني عشر: الملكية والأمان وجبهات قانونية جديدة

(1) United States Secret Service. “Know Your Money.” http://www.secretservice.gov/money_technologies.shtml.

(2) Sebastian Anthony, “The world’s first 3D-printed gun.” *ExtremeTech* (July 26, 2012). http://www.extremetech.com/extreme/133514-the-worlds-first-3d-printed-gun.

(3) Mark D. Symes, Philip J. Kitson, Jun Yan, Craig J. Richmond, Geoffrey J. T. Cooper, Richard W. Bowman, Turlif Vilbrandt, and Leroy Cronin, “Integrated 3D-printed reactionware for chemical synthesis and analysis.” *Nature Chemistry,* 4 (2012): 349–354. doi: 10.1038/nchem.1313.

(4) Nikki Olson, “3D Printing Laboratories: The Age of DIY Designer Drugs Begins.” Institute for Ethics & Emerging Technologies (April 26, 2012). http://ieet.org/index.php/ieet/more/olson20120426.

(5) Peter Hanna. “The Next Napster? Copyright questions as 3D printing comes of age.” *Ars Technica* (April 6, 2011). http://arstechnica.com/tech-policy/2011/04/the-next-napster-copyright-questions-as-3d-printing-comes-of-age/2/.

(6) Erin McCarthy, “SXSW: The Looming Legal Battles over 3D Printing.” *Popular Mechanics* (March 14, 2012). http://www.popularmechanics.com/how-to/blog/sxw-the-looming-legal-battles-over-3d-printing-7333888.

(7) http://en.wikipedia.org/wiki/Patent.

(8) Simon Bradshaw, Adrian Bowyer, and Patrick Haufe, "The Intellectual Property Implications of Low-Cost 3D Printing." *SCRIPTed,* Volume 7, Issue 1 (2010). http://www.law.ed.ac.uk/ahrc/script-ed/vol7-1/bradshaw.asp.

(9) Phillip Torrone, "MAKE's Exclusive Interview with Alicia Gibb – President of the Open Source Hardware Association." *Make* magazine (April 23, 2012). http://blog.makezine.com/2012/04/23/makes-exclusive-interview-with-alicia-gibb-president-of-the-open-source-hardware-association/.

(10) Mark A. Lemley and Carl Shapiro, "Probabilistic Patents." *Journal of Economic Perspectives,* Volume 19, Number 2 (Spring 2005): pp. 75–98.

(11) http://www.crnano.org/dangers.htm.

## الفصل الثالث عشر: تصميم المستقبل

(1) Stephen Todd and William Latham, *Evolutionary Art and Computers.* (Academic Press, September 1992).

(2) http://generativedesign.wordpress.com/2011/12/12/cracking-the-layout-problem/#more-1719.

## الفصل الرابع عشر: المرحلة التالية للطباعة الثلاثية الأبعاد

(1) Katy Scott, "Where is my flying car?" *3rd Degree,* 4(10) (September 2007). http://3degree.ecu.edu.au/articles/1378.


هنـــداوي